Leon
Lederman
con Dick Teresi

La particella di Dio

Se l'universo è la domanda, qual è la risposta?

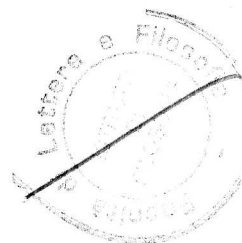
ARNOLDO
MONDADORI
EDITORE

Nel V secolo a. C., Democrito di Abdera ipotizzò che la materia sia costituita da particelle invisibili e indivisibili, alle quali attribuì il nome di «atomi». Partendo da tale intuizione, il premio Nobel per la fisica Leon Lederman, in un'epoca in cui dagli ambienti scientifici quasi ogni giorno giunge l'annuncio di scoperte riguardo alla struttura della materia, ripercorre l'affascinante storia di ricerche, esperimenti e studi svolti dall'uomo per rispondere all'antichissima e ardua domanda: «Di che cosa è fatto il mondo?». Secolo dopo secolo, egli ci permette di cogliere lo sforzo comune dell'umanità nel tentativo di individuare e descrivere l'atomo teorizzato da Democrito, uno sforzo coronato da successi sempre parziali, provvisori, inevitabilmente limitati, a fronte dei continui progressi scientifici e tecnologici. Galileo, Newton, Faraday, Rutherford, Einstein sono soltanto alcuni dei numerosi protagonisti di tale appassionante avventura, presentati come veri e propri detective alla ricerca di indizi che svelino il segreto ultimo dell'universo.
Illustrando ogni tappa di questo viaggio in una prosa chiara e accattivante, non di rado venata da un originale umorismo, Lederman ci conduce fino all'ultimo cinquantennio, in cui lo studio del mondo subatomico ha conosciuto uno sviluppo straordinario grazie alla creazione della più complessa apparecchiatura sperimentale mai realizzata: l'acceleratore di particelle. L'autore ce ne spiega il funzionamento in modo estremamente semplice, con la metafora di un affilatissimo coltello che seziona la materia fino a separarne gli elementi costitutivi (leptoni, mesoni, quark, ecc.). E, infine, immagina la possibilità di metterne a punto un nuovo, potentissimo modello in grado di fornirci la risposta definitiva sull'argomento, di farci scoprire appunto la «particella di Dio».

In sovraccoperta:
Foto in falsi colori del decadimento
risultante dall'annichilazione di un antiprotone
Foto CERN, G. Piragino/S.P.L./G. Neri

Leon Lederman
con Dick Teresi

LA PARTICELLA DI DIO

Se l'universo è la domanda,
qual è la risposta?

ARNOLDO MONDADORI EDITORE

Traduzione di Alberto Artosi e Marcello D'Agostino

ISBN 88-04-37156-0

Titolo dell'opera originale: The God Particle
I edizione febbraio 1996

Indice

Dramatis personae

Atomos o a-tomo. Particella teorica inventata da Democrito. L'atomo, invisibile e indivisibile, è l'unità minima della materia. Da non confondersi con il cosiddetto «atomo chimico», che è soltanto l'unità minima di ciascun elemento (idrogeno, carbonio, ossigeno, eccetera).

Elettrone. Il primo a-tomo a essere scoperto, nel 1898. Si ritiene che l'elettrone, come tutti gli a-tomi moderni, abbia la curiosa proprietà del «raggio zero». Appartiene alla famiglia dei leptoni.

Quark. Un altro a-tomo. Ci sono sei quark, cinque già scoperti e uno che si sta ancora ricercando (nel 1993) [Il sesto quark, il *top quark* (*quark «alto»*), è stato scoperto nell'aprile del 1994. *NdT*]. Ciascuno dei sei quark si suddivide in tre colori. Solo due dei sei, il *quark «su»* e il *quark «giù»*, esistono in natura nell'universo attuale.

Neutrino. Un altro a-tomo della famiglia dei leptoni. Ce ne sono di tre tipi diversi. I neutrini non entrano nella costituzione della materia, ma sono essenziali per certe reazioni. Sono i campioni del contesto minimalista: carica zero, raggio zero e, con ogni probabilità, massa zero.

Muone e tau. Questi leptoni sono cugini dell'elettrone, ma sono molto più pesanti.

Fotone, gravitone, la famiglia W^+, W^- *e* Z^0, *e i gluoni.* Sono particelle, ma non di materia come i quark e i leptoni. Essi trasmettono, rispettivamente, la forza elettromagnetica, la forza gravitazionale, le forze deboli e forti. Il gravitone è il solo che non sia stato ancora scoperto.

Il vuoto. Il nulla. Inventato anch'esso da Democrito. Un luogo in cui possono vagare gli atomi. Gli scienziati contemporanei hanno stipato il vuoto con un *pot-pourri* di particelle virtuali e di altra zavorra. Termini moderni: *vacuum* e, di quando in quando, etere (vedi oltre).

L'etere. Inventato da Isaac Newton, reinventato da James Clerk Maxwell. È la sostanza che riempie lo spazio vuoto dell'universo. Screditato e ripudiato da Einstein, l'etere sta avendo attualmente un rilancio nixoniano. È il vero e proprio vuoto, ma stipato di particelle teoriche, fantasmatiche.

Acceleratore. Dispositivo per aumentare l'energia delle particelle. Poiché $E = mc^2$, un acceleratore rende più pesanti queste particelle.
Sperimentatore. Fisico che fa esperimenti.
Teorico. Fisico che non fa esperimenti.

E PER LA PRIMA VOLTA...

La particella di Dio

(alias particella di Higgs, alias bosone di Higgs, alias bosone scalare di Higgs).

La particella di Dio

A Evan e Jayna

Mi piacciono le teorie della relatività e dei quanti perché non le capisco e perché mi danno l'impressione che lo spazio si trascini qua e là come un'anima in pena, rifiutandosi di fermarsi e non lasciandosi misurare; e che l'atomo sia come un essere impulsivo che cambia idea continuamente.

DAVID HERBERT LAWRENCE

I
Il pallone invisibile

> Niente esiste tranne gli atomi e il vuoto; tutto il resto è opinione.
>
> DEMOCRITO DI ABDERA

All'inizio c'era il vuoto – una curiosa forma di vuoto –, un nulla in cui non esisteva spazio, né tempo, né materia, né luce, né suono. C'erano però le leggi di natura, e questo curioso vuoto era colmo di potenzialità. Come un gigantesco macigno in bilico sul ciglio di una torreggiante scogliera...

Aspettate un momento...

Prima che il macigno precipiti, devo confessare che non so di che cosa sto parlando. Una storia comincia logicamente dall'inizio. Ma questa storia riguarda l'universo e, sfortunatamente, non ci sono *dati* sull'Inizio. Nessuno, zero. Non sappiamo niente dell'universo finché non raggiunge l'età matura di un bilionesimo di trilionesimo di secondo, cioè un tempo brevissimo dopo la sua creazione nel Big Bang. Quando leggete o sentite dire qualcosa sulla nascita dell'universo, si tratta di invenzioni. Siamo nel dominio della filosofia. Solo l'Onnipotente sa che cos'è avvenuto all'Inizio (e finora si è guardata bene dal dircelo).*

Dov'eravamo rimasti? Ah sì...

Come un gigantesco macigno in bilico sul ciglio di una torreggiante scogliera, l'equilibrio del vuoto era così perfetto che bastava un soffio a produrre un cambiamento che creasse l'universo. E il cambiamento avvenne. Il nulla esplose. In questa incandescenza iniziale furono creati spazio e tempo.

Da tale energia scaturì la materia: un denso plasma di particelle che si dissolvevano in radiazioni e tornavano materia. (Adesso, perlomeno, stiamo lavorando con in mano qualche fatto e una teoria speculativa.) Le particelle entravano in collisione e davano origine a nuove particelle. Spazio e tempo ribollivano spumeggiando mentre i buchi neri si formavano e si dissolvevano. Che spettacolo!

* Per l'uso del genere femminile riferito all'Onnipotente, cfr. p. 428.

Via via che l'universo si espandeva e si raffreddava facendosi meno denso, le particelle si fusero e le forze si differenziarono. Si formarono i protoni e i neutroni, poi i nuclei e gli atomi e immense nuvole di polvere che, mentre erano ancora in espansione, si condensarono localmente qua e là formando stelle, galassie e pianeti. Su un pianeta – un comunissimo pianeta in orbita intorno a una mediocre stella, un puntino sul braccio spiraliforme di una galassia come tante – si levarono continenti e ribollirono oceani, e dagli oceani una melma di molecole organiche reagì e formò le proteine, dando inizio alla vita. Piante e animali andarono evolvendosi da organismi semplici e, infine, arrivò l'uomo.

L'uomo si distinse, in primo luogo, perché fu la sola specie a mostrare una viva curiosità per il proprio ambiente. Con l'andar del tempo si verificarono mutazioni e una strana sottospecie di esseri umani cominciò ad aggirarsi sulla Terra. Erano esseri arroganti. Non si accontentavano di godere della magnificenza dell'universo. Si chiedevano «come?». Com'era stato creato l'universo? Come la «sostanza» dell'universo poteva aver causato l'incredibile varietà presente nel nostro mondo: le stelle, i pianeti, le lontre marine, gli oceani, i coralli, la luce solare, il cervello umano? I mutanti avevano posto una domanda alla quale era possibile dare una risposta, ma solo con il lavoro di millenni e con un'abnegazione tramandata da maestro ad allievo per centinaia di generazioni. La domanda ispirò anche un gran numero di risposte sbagliate e imbarazzanti. Per fortuna questi mutanti erano venuti al mondo privi di qualsiasi senso dell'imbarazzo. Vennero chiamati fisici.

Adesso, dopo aver esaminato la questione per più di duemila anni – un batter di ciglia sulla scala del tempo cosmologico –, cominciamo a intravedere l'intera storia della creazione. Nei nostri telescopi e microscopi, nei nostri osservatori e laboratori, e sui nostri taccuini, cominciamo a percepire le linee dell'originaria bellezza e simmetria che governarono gli istanti iniziali dell'universo. Possiamo quasi vederle. Ma l'immagine è ancora confusa e sentiamo che qualcosa sta oscurando la visione, una forza oscura che annebbia, nasconde, offusca l'intrinseca semplicità del nostro mondo.

Come funziona l'universo?

Questo libro verte su un problema, un problema che ha turbato la scienza fin dall'antichità. Quali sono i costituenti ultimi della materia? Il filosofo greco Democrito chiamò l'unità minima *atomos* (letteralmente «in-divisibile»). Questo a-tomo non è l'atomo che avete imparato a conoscere durante l'ora di scienze alle superiori, come l'idrogeno, l'elio, il litio, l'uranio e via dicendo. Queste sono entità grandi, complesse secondo i criteri odierni (e anche secondo i criteri di Democrito). Per un fisico, come per un chimico, questi atomi sono veri e propri bidoni della spazzatura pieni di particelle più piccole (elettroni, protoni e neutroni), e protoni e neutroni sono, a loro volta, recipienti colmi di cose ancora più piccole. Noi dobbiamo conoscere gli oggetti primordiali e comprendere le forze che controllano il loro comportamento sociale. È l'a-tomo di Democrito, non l'atomo del vostro professore di chimica, la chiave di accesso alla materia.

La materia che vediamo oggi intorno a noi è complessa. Vi sono all'incirca un centinaio di atomi chimici. Il numero di combinazioni utili di atomi può essere calcolato, ed è immenso: miliardi di miliardi. La natura usa queste combinazioni, chiamate molecole, per costruire pianeti, soli, virus, montagne, scontrini, il valium, gli agenti letterari e altre cose utili. Non è sempre stato così. Durante i primi istanti dopo la creazione dell'universo nel Big Bang non c'era una materia complessa come la conosciamo oggi. Non c'erano nuclei, né atomi, niente che fosse costituito di frammenti più semplici. Questo perché il calore bruciante dell'universo primordiale non consentiva la formazione di oggetti composti; tali oggetti, se si fossero formati da collisioni transitorie, si sarebbero istantaneamente decomposti nei loro costituenti più elementari. Forse esisteva un solo tipo di particella, una sola forza – o addirittura un'unità particella-forza – e le leggi della fisica. In questa entità primordiale erano contenuti i germi del mondo complesso in cui gli esseri umani si sarebbero evoluti, forse proprio per riflettere su queste cose. Potrete trovare noioso l'universo primordiale, ma per un fisico delle particelle quelli sì che erano giorni! Quale semplicità, quale bellezza, anche se confusamente visualizzata nelle nostre speculazioni.

L'inizio della scienza

Anche prima del mio eroe, Democrito, ci furono dei filosofi greci che osarono cercare di spiegare il mondo con argomenti razionali, escludendo rigorosamente la superstizione, il mito e l'intervento degli dèi. Costoro hanno contribuito in maniera decisiva a familiarizzarci con un mondo pieno di fenomeni terrificanti e apparentemente arbitrari. Ma i Greci erano anche impressionati dalle regolarità, dall'alternarsi del giorno e della notte, dal succedersi delle stagioni,

dall'azione del fuoco, del vento e dell'acqua. Intorno al 650 a.C., una formidabile tecnologia si diffuse nel bacino del Mediterraneo. Le popolazioni locali impararono a misurare la terra e a navigare con l'aiuto degli astri; possedevano una raffinata metallurgia e una conoscenza approfondita delle posizioni delle stelle e dei pianeti per fare calendari e varie predizioni. Fabbricarono eleganti utensili, raffinati tessuti e stoviglie di elaborata foggia e decorazione. In una delle colonie del dominio greco, la frenetica città di Mileto sulla costa occidentale di quella che è la moderna Turchia, prese corpo la credenza che il mondo apparentemente complesso fosse intrinsecamente semplice, e che questa semplicità si potesse scoprire con il ragionamento logico. Circa due secoli dopo, Democrito di Abdera propose l'a-tomo come principio fondamentale di un universo semplice, e la ricerca proseguì.

La fisica ebbe origine dall'astronomia perché i primi filosofi levarono gli occhi sgomenti al cielo notturno e cercarono modelli logici per la forma delle stelle, il movimento dei pianeti, il sorgere e tramontare del sole. Con il tempo, gli scienziati rivolsero gli occhi alla terra: fenomeni che avevano luogo sulla superficie terrestre – la caduta delle mele dagli alberi, il volo di una freccia, il moto regolare di un pendolo, i venti e le maree – diedero origine a un complesso di «leggi fisiche». La fisica fiorì durante il Rinascimento, diventando una disciplina distinta e separata a partire all'incirca dal 1500. Con il passare dei secoli, e con l'acuirsi delle nostre capacità di osservazione grazie all'invenzione di microscopi, telescopi, pompe ad aria, orologi, e così via, vennero scoperti sempre più fenomeni che si potevano descrivere con esattezza registrando dei numeri in un quaderno, costruendo tavole e disegnando grafici, per poi rilevare trionfalmente la loro conformità a un modello matematico.

Alla metà del XX secolo, gli atomi sono diventati la frontiera della fisica; negli anni Quaranta i nuclei si sono posti al centro della ricerca. L'osservazione si è progressivamente estesa a un numero sempre maggiore di domini. Con lo sviluppo di strumenti più potenti, abbiamo osservato più da vicino cose sempre più piccole. Le osservazioni e le misurazioni sono state inevitabilmente seguite da sintesi, concisi sommari della nostra comprensione. A ogni grande progresso il campo si divideva. Alcuni scienziati seguirono la via «riduzionistica» verso il dominio nucleare e subnucleare; altri seguirono il cammino verso una maggior comprensione degli atomi (fisica atomica), delle molecole (fisica e chimica molecolare), la fisica nucleare, e così via.

Leon cade in trappola

Le molecole sono state il mio primo amore. Alle superiori e nei primi anni d'università mi piaceva la chimica, ma mi avvicinai gradualmente alla fisica, che mi sembrava più pulita (in realtà, inodore). Fui anche molto influenzato dai ragazzi del corso di fisica, che erano più simpatici e più forti a pallacanestro. Il gigante del nostro gruppo era Isaac Halpern, attualmente professore di fisica all'Università di Washington. Egli andava dicendo che la sola ragione per la quale era venuto a vedere i suoi voti era che voleva accertarsi se la testa della A «era arrotondata o a punta». Naturalmente, gli volevamo tutti un sacco di bene. E poi era il più bravo nel salto in lungo.

Cominciai a interessarmi ai problemi della fisica affascinato dalle loro nitide conseguenze logiche e sperimentali. Durante il mio ultimo anno d'università, il mio miglior amico dai tempi della scuola, Martin Klein, ora eminente professore a Yale, mi arringò sugli splendori della fisica durante una lunga serata in compagnia di parecchie birre. Proprio così. Mi arruolai nell'esercito con una laurea in chimica e la ferma determinazione a diventare un fisico se solo fossi riuscito a sopravvivere all'addestramento e alla seconda guerra mondiale.

Entrai finalmente nel mondo della fisica nel 1948, quando cominciai il dottorato di ricerca lavorando con quello che era allora il più potente acceleratore di particelle del mondo, il sincrociclotrone dell'Università della Columbia. Dwight Eisenhower, presidente dell'istituto, tagliò il nastro d'inaugurazione della macchina nel giugno del 1950. Dal momento che avevo aiutato Ike a vincere la guerra, fui ovviamente tenuto in grande considerazione dalle autorità accademiche, che mi pagarono quasi 4000 dollari per un solo anno (con settimane di novanta ore). Quelli sì che erano bei tempi. Negli anni Cinquanta, il sincrociclotrone e altri potenti strumenti crearono la nuova disciplina della fisica delle particelle.

Per il profano, la caratteristica essenziale della fisica delle particelle è probabilmente l'attrezzatura, l'insieme degli strumenti. Io mi unii alla ricerca proprio quando gli acceleratori di particelle stavano entrando nella maggiore età. Essi dominarono la fisica nei successivi quarant'anni e la dominano tuttora. Il primo «frantumatore di atomi» misurava pochi centimetri di diametro. Oggi il più potente acceleratore del mondo si trova al Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) a Batavia, nell'Illinois. La macchina del Fermilab, che si chiama Tevatron, ha una circonferenza di oltre sei chilometri e frantuma insieme protoni e antiprotoni ad altissime energie. Verso il

2000, o giù di lì, il monopolio delle frontiere dell'energia del Tevatron verrà infranto. Il Super Collisore Superconduttore (SSC), la madre di tutti gli acceleratori, che si sta attualmente costruendo nel Texas, avrà una circonferenza di ottantasette chilometri.

Talvolta ci domandiamo: abbiamo sbagliato in qualcosa? Siamo diventati preda dell'ossessione degli strumenti? La fisica delle particelle è una specie di scienza arcana, con enormi gruppi di ricercatori e macchine megalitiche che si occupano di fenomeni così astratti che nemmeno l'Onnipotente è sicura di ciò che accade quando le particelle collidono ad alte energie? Possiamo acquistare fiducia e ispirazione guardando all'intero processo come se seguisse un Cammino cronologico, che può verosimilmente aver avuto inizio nella colonia greca di Mileto nel 650 a.C. La meta del Cammino è una città dove tutto è stato compreso, dove tutti, dal sindaco agli spazzini, sanno come funziona l'universo. Molti hanno seguito il Cammino: Democrito, Archimede, Copernico, Keplero, Galileo, Newton, Faraday, per arrivare a Einstein, Fermi e ai miei contemporanei.

Il Cammino si restringe e si allarga: è fatto di lunghi rettilinei attraverso il nulla (come la statale 80 attraverso il Nebraska) e di tratti curvi di intensa attività. Vi sono allettanti strade laterali che si chiamano «ingegneria elettrica», «chimica», «comunicazioni radio» o «materia condensata». Coloro che hanno preso queste laterali hanno cambiato le modalità di vita della gente sul pianeta. Ma coloro che perseverano sul Cammino trovano ovunque lo stesso segnale: «Come funziona l'universo?». È su questo Cammino che incontriamo gli acceleratori degli anni Novanta.

Cominciai a seguire il Cammino nella 120ª strada a New York. A quei tempi i problemi scientifici apparivano molto chiari e importanti. Essi riguardavano le proprietà della cosiddetta «interazione nucleare forte» e di alcune particelle, della cui esistenza si aveva solo un'anticipazione teorica, chiamate mesoni π o *pioni*. L'acceleratore dell'Università della Columbia fu progettato per produrre una grande quantità di pioni bombardando innocenti bersagli con protoni. A quel tempo, la strumentazione era piuttosto semplice, abbastanza semplice perché anche uno studente potesse conoscerla.

Negli anni Cinquanta l'Università della Columbia era una fucina della fisica. Charles Townes avrebbe presto scoperto il laser e vinto il premio Nobel. James Rainwater avrebbe vinto lo stesso premio per il suo modello nucleare e Willis Lamb per aver misurato il leggerissimo spostamento nelle righe spettrali dell'idrogeno. Il Nobel Isaac Isidor Rabi, che fu un maestro per tutti noi, era a capo di un gruppo del quale facevano parte Norman Ramsey e Polykarp Kusch, i quali a loro volta avrebbero poi vinto il premio Nobel. T.D. Lee condivise il Nobel per la sua teoria della violazione della parità. La densità di professori che erano stati consacrati con l'acqua santa svedese era al tempo stesso comica e deprimente. Alcuni di noi, appartenenti alla componente giovanile della facoltà, cominciarono a portare, attaccati al risvolto della giacca, dei bottoni con su scritto «Non ancora».

Per quanto mi riguarda, il Big Bang del riconoscimento professionale ebbe luogo nel periodo 1959-1962, quando insieme a due miei colleghi dell'Università della Columbia realizzai la prima misurazione in assoluto delle collisioni di neutrini ad alte energie. I neutrini sono le mie particelle preferite. Un neutrino non ha quasi proprietà: né massa (o piccolissima), né carica elettrica, né raggio; e, per aggiungere al danno la beffa, nessuna interazione forte agisce su di esso. L'eufemismo usato per descrivere un neutrino è «elusivo». Esiste a malapena, e può passare attraverso milioni di chilometri di solido piombo con solo una trascurabile probabilità di venire coinvolto in una collisione misurabile.

Il nostro esperimento del 1961 fornì la pietra angolare di quello che, negli anni Settanta, diventò noto come «modello standard» della fisica delle particelle. Nel 1988, l'esperimento fu riconosciuto dalla Reale Accademia svedese delle scienze con il premio Nobel. (Tutti si chiedono perché mai abbiano aspettato ventisette anni. Davvero non lo so. Ero solito fornire alla mia famiglia la scusa scherzosa che l'Accademia era andata con i piedi di piombo perché non riusciva a decidere a quale dei miei grandi meriti si dovesse rendere omaggio.) Vincere il premio fu senz'altro motivo di grande emozione. Ma questa non è nemmeno lontanamente paragonabile all'incredibile stato di eccitazione che si impadronì di noi nel momento in cui ci accorgemmo che il nostro esperimento era riuscito.

I fisici provano oggi le stesse sensazioni che gli scienziati hanno provato per secoli. La vita di un fisico è piena di ansia, dolore, difficoltà, tensione, attacchi di disperazione, depressione e scoraggiamento. Ma questi sono inframmezzati da lampi di allegria, scoppi di risa, gioia ed esultanza. Queste manifestazioni sono imprevedibili. Spesso sono semplicemente generate dall'improvvisa comprensione di qualcosa di nuovo e importante, di qualcosa di bello che qualcun altro ha rivelato. Tuttavia, se siete mortali, come la maggior parte dei fisici di mia conoscenza, i momenti di gran lunga più belli sono quelli in cui scoprite voi stessi qualche nuovo fatto sull'universo. È sorprendente quanto spesso ciò accada alle tre del mattino, quando siete soli nel laboratorio e siete venuti a conoscenza di qualcosa di

importante, e vi rendete conto che nessuno degli altri cinque miliardi di persone sulla terra sa quello che voi sapete. O così sperate. Naturalmente, vi affretterete a dirlo loro il più presto possibile. È quel che si chiama «pubblicare».

Questo è un libro su una serie di momenti infinitamente belli che gli scienziati hanno vissuto durante gli ultimi 2500 anni. La somma di tali momenti costituisce la nostra attuale conoscenza di che cos'è e come funziona l'universo. Pena e depressione fanno anch'esse parte della storia. Spesso è l'ostinazione, la scontrosità, la pura e semplice testardaggine della natura a frapporsi al momento dell'«eureka».

La felicità, nella vita di uno scienziato, non può però dipendere unicamente dai momenti di «eureka». Dev'esserci qualche gioia anche nelle attività quotidiane. Per me questa gioia sta nel progettare e costruire apparecchiature che ci aiuteranno a capire qualcosa di tale argomento straordinariamente astratto. Quando ero un impressionabile dottorando all'Università della Columbia, aiutai un professore di fama mondiale in visita da Roma a costruire un contatore di particelle. Io ero il novellino e lui l'esperto. Insieme tornimmo il tubo di ottone (erano le cinque del pomeriggio passate e i meccanici erano andati tutti a casa). Saldammo i puntali con l'estremità di vetro e facemmo passare un filo d'oro attraverso la corta paglia metallica isolata sparsa nel vetro. Facemmo scorrere lo speciale gas attraverso il contatore per alcune ore mentre collegavamo al filo un oscilloscopio protetto da una corrente della potenza di 1000 volt mediante uno speciale resistore. Il mio amico professore – lo chiameremo Gilberto, visto che questo era il suo nome – teneva gli occhi incollati alla traccia verde dell'oscilloscopio mentre, in un inglese impeccabilmente sgrammaticato, mi teneva una conferenza sulla storia e l'evoluzione dei contatori di particelle. Tutt'a un tratto Gilberto prese ad agitarsi come un matto. «Mamma mia! *Regardo incredibilo! Primo secourso!*» (o qualcosa del genere). Gridava, gesticolava. Mi sollevò in aria, anche se ero una spanna più alto e venti chili più pesante di lui, e mi trascinò in un giro di valzer per la stanza.

«Che cos'è successo?» farfugliai.

«*Mufiletto!*» rispose. «*Izza counting. Izza counting!*»

Anche se stava probabilmente facendo un po' di scena a mio beneficio, era davvero eccitato dal fatto che, con le nostre mani, occhi e cervelli, avessimo messo insieme un aggeggio che rivelava il passaggio di particelle di raggi cosmici e le registrava sotto forma di macchioline nel tracciatore dell'oscilloscopio. Anche se doveva aver visto questo fenomeno migliaia di volte, continuava sempre a emozionarsi allo

stesso modo. Che una delle particelle potesse aver cominciato il suo viaggio fino alla 120ª strada a Broadway, decimo piano, in una galassia lontana anni luce, era solo in parte motivo di tanta emozione. L'entusiasmo apparentemente illimitato di Gilberto era contagioso.

La biblioteca della materia

Quando spiego la fisica delle particelle elementari, mi servo spesso (abbellendola) di una garbata metafora del poeta e filosofo latino Lucrezio. Supponiamo che ci venga assegnato il compito di scoprire gli elementi costitutivi primari di una biblioteca. Che fare? Di primo acchito potremmo classificare i libri in varie categorie secondo il soggetto: storia, scienza, biografia. O forse potremmo organizzarli secondo le dimensioni: grossi, sottili, alti, bassi. Dopo aver preso in considerazione molte classificazioni del genere ci accorgiamo che i libri sono oggetti complessi che possono venire facilmente scomposti. Così guardiamo al loro interno. Capitoli, paragrafi e frasi sono presto scartati in quanto costituenti ineleganti e complessi. Le parole! A questo punto ci ricordiamo che sul tavolo vicino all'ingresso c'è un grosso catalogo di tutte le parole presenti nella biblioteca, il dizionario. Seguendo certe regole di comportamento, che chiamiamo grammatica, possiamo usare le parole del dizionario per comporre tutti i libri che si trovano nella biblioteca. Le medesime parole sono usate ripetutamente e assemblate in modi diversi.

Ma le parole sono così tante! Un'ulteriore riflessione ci porta alle lettere, dal momento che le parole sono «scomponibili». Adesso ci siamo. Ventisei lettere possono formare decine di migliaia di parole e queste, a loro volta, formare milioni (miliardi?) di libri. Adesso dobbiamo introdurre un ulteriore insieme di regole, l'ortografia, per restringere le combinazioni di lettere. Senza l'intervento di un giovanissimo critico potremmo rendere pubblica prematuramente la nostra scoperta. Il giovane critico direbbe, con indubbio compiacimento: «Non occorrono ventisei lettere, nonno. Tutto ciò che serve è uno zero e un uno». I bambini d'oggi crescono trastullandosi con giocattoli digitali e si trovano a loro agio con algoritmi per computer che convertono gli zero e gli uno nelle lettere dell'alfabeto. Se siete troppo vecchi per questo, siete forse abbastanza vecchi per ricordare l'alfabeto Morse, composto di linee e di punti. In entrambi i casi abbiamo la successione seguente: 0 o 1 (o punto e linea) con il codice appropriato per formare le ventisei lettere; l'ortografia per formare tutte le parole del

dizionario; la grammatica per comporre le parole in frasi, paragrafi, capitoli e, finalmente, in libri. I libri compongono la biblioteca.

Orbene, se non ha senso scomporre ulteriormente lo 0 o l'1, abbiamo scoperto i costituenti ultimi, a-tomici, della biblioteca. Nella metafora, imperfetta com'è, l'universo è la biblioteca, le forze della natura sono la grammatica, l'ortografia e l'algoritmo, e lo 0 e l'1 sono quelli che chiamiamo quark e leptoni, i nostri attuali candidati al ruolo degli a-tomi di Democrito. Tutti questi oggetti sono, ovviamente, invisibili.

I quark e il papa

La signora del pubblico era inflessibile. «Ha mai *visto* un atomo?» insisteva. Si tratta di una domanda comprensibile, anche se irritante per uno scienziato che ha convissuto a lungo con la realtà oggettiva degli atomi. Io posso visualizzarne la struttura interna. Posso richiamare alla memoria delle immagini mentali di macchie simili a nubi di «presenze» elettroniche che circondano il puntino infinitesimale del nucleo che attrae verso di sé la nube indistinta di elettroni. Questa immagine mentale non è mai esattamente la stessa per due scienziati, perché entrambi la ricavano da equazioni. Queste prescrizioni scritte non sono molto «amichevoli» quando si tratta di venire incontro al bisogno umano dello scienziato di un'immagine visiva. Tuttavia, noi possiamo «vedere» atomi, protoni e – perché no? – quark.

I miei sforzi di rispondere a questa spinosa domanda cominciano sempre con un tentativo di generalizzare la parola «vedere». «Vedete» questa pagina se portate gli occhiali? Se state guardando una versione microfilmata? Se state guardando una fotocopia (derubandomi quindi dei miei diritti d'autore)? Se state leggendo il testo sul video di un computer? Infine, in preda ormai alla disperazione, chiedo: «Avete mai visto il papa?».

«Certamente» è di solito la risposta. «L'ho visto alla televisione.» Ma davvero? Ciò che avete visto è un fascio di elettroni che colpisce del fosforo all'interno di uno schermo di vetro. La mia evidenza in favore dell'atomo, o del quark, è esattamente la stessa.

Qual è questa evidenza? Tracce di particelle in una camera a bolle. Nell'acceleratore del Fermilab, il «residuo» di una collisione fra un protone e un antiprotone è catturato elettronicamente da un rivelatore da 60 milioni di dollari alto come un palazzo di tre piani. Qui l'«evidenza», il «vedere», è costituita da decine di migliaia di sensori che sviluppano un impulso elettrico al passaggio di una particella. Tutti questi impulsi sono inviati, attraverso centinaia di migliaia di fili, a elaboratori elettronici. Infine, vengono registrati su bobine di nastro magnetico, codificati mediante zero e uno. Questo nastro registra le collisioni calde di protoni contro antiprotoni, che possono generare fino a settanta particelle che si disperdono nelle varie sezioni del rivelatore.

La scienza, e in particolare la fisica, acquista fiducia nelle proprie conclusioni per duplicazione – vale a dire, un esperimento in California è confermato da un diverso modello di acceleratore che opera a Ginevra – e anche incorporando in ogni esperimento verifiche e controlli che confermano che il funzionamento dell'apparecchiatura risponde a ciò per cui è stata progettata. È un lungo e complicato processo, il risultato di decenni di esperimenti.

Tuttavia, per molte persone la fisica delle particelle rimane impenetrabile. L'inflessibile signora del pubblico non è la sola a essere disorientata da un gruppetto di scienziati che corrono dietro a infinitesimali oggetti invisibili. E allora vediamo un po' con un'altra metafora.

Il pallone invisibile

Immaginate una specie di esseri intelligenti che abitano il pianeta Twilo. Essi hanno più o meno il nostro aspetto, parlano come noi, si comportano in tutto e per tutto come esseri umani, tranne che in una cosa. Il loro apparato visivo ha una particolarità per cui non riescono a vedere oggetti con nette giustapposizioni di bianco e nero. Per esempio, non riescono a vedere le zebre. O le maglie a strisce bianconere. O i palloni da calcio. Incidentalmente, non si tratta di una particolarità così strana. I terrestri sono ancora più strani. Per esempio, noi abbiamo due macchie laterali cieche al centro del campo visivo. La ragione per cui non vediamo questi «buchi» è che il cervello congettura, per estrapolazione dall'informazione proveniente dal resto del campo, che cosa *dovrebbe* esserci in essi, e poi li riempie per noi. Di norma, gli esseri umani guidano a 100 all'ora sull'autostrada, operano sul cervello e fanno giochi di destrezza con torce fiammeggianti anche se una parte di ciò che vedono non è altro che una buona congettura.

Supponiamo che un contingente di Twiloniani giunga sulla Terra in missione amichevole. Per dar loro un assaggio della nostra cultura li portiamo a vedere uno degli eventi culturali più popolari del pianeta: una partita di calcio della Coppa del mondo. Naturalmente, noi ignoriamo che essi non riescono a vedere il pallone bianco e nero. Così, essi si siedono al loro posto assistendo alla partita con

un'espressione del volto educata ma perplessa. Per quello che i Twiloniani possono vedere, un gruppo di persone in pantaloni corti stanno correndo su e giù per il campo lanciando in aria le gambe senza ragione, scontrandosi l'una con l'altra e cadendo per terra. A volte un personaggio in veste ufficiale emette un fischio, un giocatore corre verso i bordi del campo, si ferma e solleva entrambe le braccia sulla testa mentre gli altri giocatori lo guardano. Di tanto in tanto il portiere si abbatte inesplicabilmente al suolo, esplode un grande applauso e viene assegnato un punto alla squadra avversaria.

I Twiloniani passano circa quindici minuti in un stato di totale disorientamento. Poi, con il passare del tempo, tentano di capire il gioco. Alcuni usano tecniche classificatorie. Deducono, in parte dall'abbigliamento, che ci sono due squadre in gara. Fanno un diagramma dei movimenti dei vari giocatori, scoprendo che ogni atleta sembra rimanere più o meno entro una certa area geografica del campo. Scoprono che differenti giocatori compiono differenti movimenti. I Twiloniani, esattamente come farebbero gli esseri umani, procedono nella ricerca del significato di una partita di Coppa del mondo dando nomi ai differenti ruoli ricoperti da ciascun giocatore. I ruoli vengono categorizzati, confrontati ed elencati su una gigantesca mappa. Un grande cambiamento interviene quando i Twiloniani scoprono che esiste una *simmetria*. Per ogni posizione della squadra A c'è una posizione corrispettiva nella squadra B.

A due minuti dalla fine della gara, i Twiloniani hanno accumulato decine di carte, centinaia di tavole e formule e una quantità imprecisata di complicate regole sulle partite di calcio. E benché le regole possano, entro certi limiti, essere tutte corrette, nessuna di esse cattura realmente l'essenza del gioco. Allora, una mezza cartuccia di un Twiloniano, che fino a quel momento se n'era stato zitto, viene fuori con la sua idea. «Ipotizziamo» azzarda nervosamente «l'esistenza di un pallone invisibile.»

«Che cosa dici?» replicano i Twiloniani più vecchi.

Mentre i più anziani andavano alla ricerca di ciò che appariva come l'essenza del gioco, l'andirivieni dei vari giocatori e le linee di demarcazione del campo, la mezza cartuccia teneva gli occhi aperti per cogliere eventi rari. E ne trovò uno. Subito prima che l'arbitro annunciasse un punto, e un mezzo secondo prima che la folla esplodesse in un frenetico applauso, il giovane Twiloniano ebbe modo di notare il momentaneo apparire di un rigonfiamento sul fondo della rete. Il calcio è un gioco a basso punteggio, e dunque c'erano stati pochi rigonfiamenti da osservare, e ciascuno della durata di un attimo. Ciononostante, c'erano stati abbastanza eventi da consentire alla mezza cartuccia di notare che ogni rigonfiamento era di forma emisferica. Di qui la sua audace conclusione che il gioco del calcio dipende dall'esistenza di un pallone invisibile (invisibile, almeno, per i Twiloniani).

Il resto del contingente twiloniano ascoltò la sua teoria e, per quanto l'evidenza empirica fosse debole, dopo molto ragionare concluse che il giovanotto aveva ragione. Uno dei dignitari più attempati del gruppo, che risultò poi essere un fisico, osserva che pochi eventi rari sono talvolta più illuminanti di migliaia di eventi comuni. Ma l'argomento decisivo è il semplice fatto che *deve* esserci un pallone. Si ammetta l'esistenza di un pallone, che per un motivo o per l'altro i Twiloniani non possono vedere, e improvvisamente tutto quadra. Il gioco acquista un senso. Non solo, ma tutte le teorie, le mappe e i diagrammi compilati nel corso del pomeriggio rimangono validi. Il pallone dà semplicemente un senso alle regole.

Questa metafora vale, più o meno, per molti rompicapi della fisica, e soprattutto della fisica delle particelle. Non possiamo comprendere le regole (le leggi di natura) se non conosciamo gli oggetti (il pallone), e se non crediamo in un sistema logico di leggi non saremo mai in grado di dedurre l'esistenza di tutte le particelle.

La piramide della scienza

Qui stiamo parlando della scienza e della fisica; così, prima di andare avanti, definiamo alcuni termini. Che cos'è un fisico? E la sua attività dove si colloca nel grande schema di classificazione delle scienze?

Esiste una gerarchia distinguibile, anche se non di ruoli sociali o di capacità intellettuali. Frederick Turner, un umanista dell'Università del Texas, l'ha formulata con grande eloquenza. La scienza, ha detto, è fatta come una piramide. La base della piramide è costituita dalla matematica, non perché la matematica sia più astratta o più grandiosa, ma perché non si fonda su, o non ha bisogno di, nessuna delle altre discipline, laddove la fisica, il livello successivo della piramide, si fonda sulla matematica. Immediatamente al di sopra si situa la chimica, che richiede la disciplina della fisica; in questa (ovviamente semplicistica) separazione, la fisica non si occupa delle leggi della chimica. Per esempio, i chimici si interessano a come gli atomi si combinano per formare molecole e a come le molecole si comportano in una situazione di stretta prossimità. Le forze agenti fra gli atomi sono complesse, ma, in ultima analisi, hanno a che fare con la legge di attrazione e repulsione di particelle elettricamente cariche; in altri ter-

mini, con la fisica. Poi c'è la biologia, che si fonda sia sulla chimica sia sulla fisica. I livelli superiori della piramide diventano via via più sfumati e meno definibili: quando si arriva alla fisiologia, alla medicina, alla psicologia, la gerarchia diventa meno netta. Ai confini ci sono le discipline «composte»: la fisica matematica, la chimica fisica, la biofisica. Naturalmente, devo far rientrare a forza l'astronomia nella fisica, e non so che posto dare alla geofisica o alla neurofisiologia.

La piramide può essere sbrigativamente ricapitolata da un vecchio detto: i fisici rispondono solo ai matematici e i matematici rispondono solo a Dio (anche se avreste il vostro bel da fare a trovarne uno così modesto).

Sperimentatori e teorici: contadini, maiali e tartufi

Nella disciplina della fisica delle particelle ci sono teorici e sperimentatori. Io appartengo a questa seconda categoria. In generale, la fisica progredisce come effetto dell'interazione di queste due categorie. Nell'eterno rapporto di amore-odio fra teoria ed esperimento c'è una specie di punteggio. Quante scoperte sperimentali importanti sono state predette dalla teoria? Quante sono state le vere e proprie sorprese? Per esempio, l'elettrone positivo (positrone) è stato anticipato dalla teoria, e così pure il pione, l'antiprotone e il neutrino. Il muone, il leptone tau e ypsilon sono stati delle sorprese. Un esame più approfondito indica più o meno un pareggio in questa futile controversia. Ma chi tiene il conto?

Fare esperimenti vuol dire osservare e misurare. Ciò comporta la costruzione di speciali condizioni in cui osservazioni e misurazioni risultino più feconde. Gli antichi Greci e gli astronomi moderni hanno un problema in comune. Non manipolavano, e non manipolano, gli oggetti della loro osservazione. Gli antichi Greci non potevano o non volevano: si accontentavano della pura e semplice speculazione. Gli astronomi desidererebbero ardentemente far scontrare due soli – o meglio due galassie – ma non hanno ancora sviluppato questa capacità, e devono accontentarsi di migliorare la qualità delle loro osservazioni. Ma in Spagna abbiamo 1003 modi di studiare le proprietà delle nostre particelle.

Grazie agli acceleratori possiamo progettare esperimenti per scoprire l'esistenza di nuove particelle. Possiamo organizzare le particelle in modo che si scontrino con i nuclei atomici, e leggere i dettagli delle conseguenti deflessioni nello stesso modo in cui gli studiosi della civiltà micenea leggono la lineare B, se riusciamo a decifrare il

codice. Produciamo particelle e poi le «osserviamo» per vedere la durata della loro vita.

Una nuova particella è prevista quando una sintesi dei dati esistenti da parte di un teorico perspicace sembra rendere necessaria la sua esistenza. Molto spesso essa non esiste, e quella particolare teoria ne soffre. Se essa soccombe o no, dipende dalle capacità di reazione del teorico. Il punto essenziale è che vengono effettuati entrambi i tipi di esperimenti: quelli designati a controllare una teoria e quelli designati a esplorare un nuovo dominio. Naturalmente, è spesso molto più divertente *confutare* una teoria. Come ha scritto Thomas Huxley, «La grande tragedia della scienza, il brutale assassinio di una bella ipotesi da parte di un brutto fatto». I buoni teorici spiegano il già noto e predicono i risultati di nuovi esperimenti. L'interazione fra teoria ed esperimento è una delle gioie della fisica delle particelle.

Fra gli insigni sperimentatori nella storia della scienza, alcuni – fra i quali Galileo, Kirchhoff, Faraday, Ampère, Hertz, i Thomson (J.J. e G.P.) e Rutherford – erano anche degli agguerritissimi teorici. Lo sperimentatore-teorico è una specie in via d'estinzione. Un'illustre eccezione ai nostri tempi è stato Enrico Fermi. I.I. Rabi ha espresso la sua preoccupazione per l'approfondirsi del divario osservando che gli scienziati sperimentali europei non sono in grado di fare una somma, mentre gli scienziati teorici non riescono ad allacciarsi le scarpe. Oggigiorno abbiamo due gruppi di fisici che perseguono il comune obiettivo di capire l'universo, ma con una grande differenza di prospettiva culturale, capacità e abitudini di lavoro. I teorici hanno la tendenza ad arrivare tardi al lavoro, partecipano a faticosissimi convegni su qualche isola greca o sulle montagne svizzere, si prendono lunghe vacanze e molto più spesso sono impegnati a casa, a portar fuori la spazzatura. Hanno la tendenza a preoccuparsi dell'insonnia. Si dice che un teorico sia andato tutto preoccupato dal medico del laboratorio: «Dottore, mi aiuti! Dormo benone tutta la notte e abbastanza bene al mattino, ma mi giro e mi rigiro per tutto il pomeriggio». Questo comportamento è all'origine dell'ingiusta caratterizzazione di *The Leisure of the Theory Class* (Il tempo libero dei teorici) come parodia del capolavoro di Thorstein Veblen.*

Gli sperimentatori non fanno tardi: in realtà non vanno mai a casa. Durante un intenso periodo di lavoro al laboratorio, il mondo ester-

* Thorstein Veblen, economista e sociologo statunitense, è l'autore di un saggio dal titolo *The Theory of the Leisure Class* (Teoria della classe agiata), trad. it. Torino, Einaudi, 1949. (*NdT*)

no svanisce e l'ossessione diventa totale. Dormire vuol dire riuscire a raggomitolarsi per un'ora sul pavimento dell'acceleratore. Un fisico teorico può passare tutta la vita senza affrontare la sfida intellettuale del lavoro sperimentale, senza provarne un solo brivido, né correrne un solo pericolo (la gru sopra la testa con le sue dieci tonnellate di carico, il teschio lampeggiante e i segnali PERICOLO, RADIOATTIVITÀ). L'unico vero pericolo che può correre un teorico è quello di pungersi con la matita mentre cerca di infilzare un errore che si annida nei suoi calcoli. Il mio atteggiamento verso i teorici è un misto di invidia e di timore, ma anche di affetto e di stima. Tutti i teorici scrivono libri di divulgazione scientifica: Heinz Pagels, Frank Wilczek, Stephen Hawking, Richard Feynman e altri. E perché non dovrebbero? Hanno tanto di quel tempo libero! I teorici hanno la tendenza a essere arroganti. Durante il mio regno al Fermilab mettevo solennemente in guardia il gruppo dei teorici contro l'arroganza. Almeno uno di loro mi prese sul serio. Non dimenticherò mai la preghiera che una volta udii provenire dal suo studio: «O Signore, perdonami per aver peccato di arroganza e per arroganza, Signore, intendo quanto segue...».

I teorici, come molti altri scienziati, possono essere ferocemente, talvolta assurdamente, competitivi. Ma alcuni sono sereni, ben al di sopra delle lotte che coinvolgono i semplici mortali. Enrico Fermi ne è un classico esempio. Almeno all'apparenza, il grande fisico italiano non lasciò mai intendere di attribuire una qualsiasi importanza alla competizione. Là dove il fisico comune avrebbe detto «Ci siamo arrivati noi per primi», Fermi desiderava solo conoscere i dettagli. Sia come sia, un giorno d'estate, in una spiaggia vicino al Brookhaven Laboratory a Long Island, gli mostrai come scolpire delle forme realistiche sulla sabbia bagnata. Egli insistette immediatamente perché facessimo una gara per vedere chi scolpiva il miglior nudo sdraiato. (Mi guardo bene dal rivelare il risultato della gara. Dipende dall'ipotesi che voi parteggiate per la scuola di nudo mediterranea o di Pelham Bay.)

Una volta, a un convegno, mi trovai a sedere a tavola vicino a Fermi. Preso da reverenziale timore alla presenza del grand'uomo, gli chiesi che cosa pensasse di ciò che avevamo appena sentito a proposito delle prove dell'esistenza di una particella chiamata «K-zero-due». Egli mi fissò per un istante, poi disse: «Giovanotto, se riuscissi a ricordare i nomi di tutte queste particelle sarei stato un botanico». Questa storiella è stata raccontata da molti fisici, ma l'impressionabile giovane ricercatore ero *io*.

I teorici possono essere persone cordiali, entusiaste, con cui gli sperimentatori (come noi, nient'altro che idraulici ed elettricisti) amano conversare e da cui amano imparare. Ho avuto la fortuna di intrattenere lunghe conversazioni con alcuni dei più eminenti teorici del nostro tempo: il compianto Richard Feynman, il suo collega al Cal Tech Murray Gell-Mann, il texano per eccellenza Steven Weinberg e il mio rivale in comicità Shelly Glashow. James Bjorken, Martinus Veltman, Mary Gaillard e T.D. Lee sono altri grandi con i quali è stato divertente interagire, imparare e stuzzicarsi. Una parte significativa dei miei esperimenti è stata suggerita dagli articoli di questi sapienti e dalle discussioni con loro. Alcuni teorici sono molto meno amabili, dal momento che la loro acuta intelligenza si mescola con una curiosa insicurezza che fa pensare a ciò che Salieri dice del giovane Mozart nel film *Amadeus*: «Signore, perché hai incarnato un così eccelso compositore nel corpo di uno stronzo?».

I teorici hanno la tendenza a raggiungere l'acme in giovane età; i succhi creativi tendono a fluire molto presto e cominciano a prosciugarsi dopo i quindici anni, o così pare. Essi non hanno bisogno di conoscenze superflue; in gioventù non hanno accumulato un inutile bagaglio intellettuale.

Naturalmente, i teorici tendono a ricevere una parte indebita del merito delle scoperte. La triade teorico-sperimentatore-scoperta è stata occasionalmente paragonata alla triade contadino-maiale-tartufo. Il contadino porta il maiale in una zona dove si possono trovare dei tartufi. Il maiale cerca diligentemente i tartufi. Finalmente ne trova uno e, proprio quando sta per divorarlo, il contadino glielo porta via.

Quelli che stanno alzati fino a tardi

Nei capitoli che seguono descriverò la storia e il futuro della materia com'è stata vista attraverso gli occhi dei ricercatori, mettendo in rilievo – in maniera spero non sproporzionata – il ruolo degli sperimentatori. Pensate a Galileo che si arrampica in cima alla Torre pendente di Pisa e lascia cadere due pesi diversi su un'asse di legno in modo da poter verificare se si sentono uno o due impatti. Pensate a Fermi e ai suoi colleghi che provocano la prima reazione a catena prolungata sotto lo stadio di football dell'Università di Chicago.

Quando parlo della sofferenza e delle avversità che affliggono la vita di uno scienziato intendo qualcosa di più di semplici angosce esistenziali. L'opera di Galileo fu condannata dalla Chiesa. Madame Curie pagò con la vita, vittima della leucemia provocata dalle radiazioni. Troppi di noi sono affetti da cataratta. Nessuno di noi dorme abba-

stanza. La maggior parte di ciò che sappiamo sull'universo lo dobbiamo a un gruppo di signori (e signore) che stanno alzati fino a tardi.

Naturalmente, della storia dell'a-tomo fanno parte anche i teorici. Essi ci sono d'aiuto durante quelli che Steven Weinberg chiama «i periodi bui fra le grandi scoperte sperimentali», portandoci, com'egli dice, «a cambiare quasi impercettibilmente le nostre credenze precedenti». Anche se è attualmente superato, il libro di Weinberg, *I primi tre minuti*,* è stato uno dei migliori resoconti divulgativi sulla nascita dell'universo. (Ho sempre pensato che le ragioni del suo successo commerciale vadano ricercate nel fatto che la gente credeva che si trattasse di un manuale di educazione sessuale.) Metterò in risalto le misurazioni decisive che abbiamo effettuato nell'atomo. Ma non si può parlare di dati senza chiamare in causa la teoria. Che cosa significano tutte queste misurazioni?

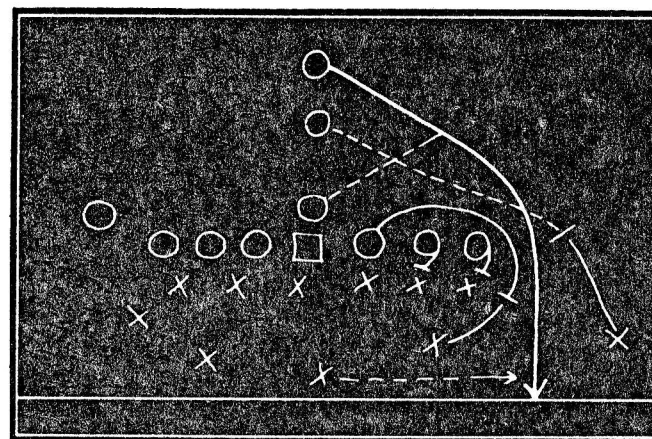
Oh, oh, la matematica!

Adesso faremo quattro chiacchiere sulla matematica. Nemmeno gli sperimentatori possono cavarsela senza numeri ed equazioni. Eliminare del tutto la matematica sarebbe come per un antropologo trascurare di esaminare il linguaggio della cultura che sta studiando, o come per uno studioso di Shakespeare non aver imparato l'inglese. La matematica è una componente così complessa del tessuto della scienza, specialmente della fisica, che farne a meno significherebbe rinunciare a gran parte della bellezza, della precisione di espressione, del costume rituale dell'argomento. A livello pratico, la matematica rende più facile spiegare come si sono sviluppate le idee, come funzionano gli strumenti, come il tutto si combina insieme. Trovate qui un numero, là lo stesso numero: forse c'è una relazione.

Ma non disperatevi. Non ho intenzione di fare dei calcoli. E, alla fine, non ci sarà traccia di matematica. In un corso – chiamato «Meccanica quantistica per i poeti» – che ho tenuto all'Università di Chicago per specializzandi in discipline non scientifiche, abbordai l'argomento parlando all'intera classe di matematica senza mai – Dio mi perdoni – *farla* veramente. Trovo che dei simboli astratti sulla lavagna stimolino automaticamente l'organo che secerne i succhi che ottenebrano la vista. Per esempio, se scrivo $x = vt$ (si legge ics uguale vi per ti), un rantolo si leva nell'aula. Non è che questi brillanti figli di genitori che pagano 20.000 dollari di tasse all'anno non riescano a

* Trad. it. Milano, Mondadori, 1980. (*NdT*)

cavarsela con $x = vt$. Date loro dei numeri per x e t e chiedete di calcolare il valore di v, e il 48% lo farà bene, il 15% rifiuterà di rispondere su consiglio del proprio avvocato e il 5% scapperà via. (Sì, lo so che la somma non è 100, ma io sono uno sperimentatore, non un teorico. Inoltre, simili stupidi errori servono a dare fiducia ai miei allievi.) Ciò che stranisce gli studenti è il sapere che sto per parlare di matematica. Parlare di matematica è una novità, li mette in un uno stato di estremo disagio.

Per riguadagnare il rispetto e l'attenzione dei miei studenti passo immediatamente a un argomento più familiare e che li mette maggiormente a loro agio. Guardate quel che segue:

Immaginatevi un marziano che guarda questo diagramma cercando di trovarvi un senso. Le lacrime gli sgorgano copiose dall'ombelico. Ma il tifoso dei tempi del liceo in agguato dentro di voi sbraita: «È la linea d'attacco dei Washington Redskins, dannazione!». Questa rappresentazione dell'azione di placcaggio di un terzino è tanto più semplice di $x = vt$? In verità, è altrettanto astratta e certamente più misteriosa. L'equazione $x = vt$ funziona in qualunque parte dell'universo. L'azione di gioco dei Redskins può segnare una meta a Detroit o Buffalo, ma mai contro gli Orsi.

Pensate dunque alle equazioni come aventi un significato nel mondo reale, proprio come i diagrammi delle partite di football, per quanto ultracomplicati e poco eleganti, hanno un significato reale nel campo di gioco. In effetti, non è tanto importante manipolare l'equazione $x = vt$, quanto riuscire a leggerla, a capirla come asserzione sull'uni-

verso in cui viviamo. Comprendere $x = vt$ significa acquistare un potere. Diverrete capaci di predire il futuro e di leggere il passato. È sia l'oui-ja* sia la stele di Rosetta. Che significa, dunque?

La x ci dice dove si trova la cosa. La cosa può essere Enrico che procede a velocità di crociera sull'autostrada a bordo della sua Porsche, o un elettrone che schizza fuori da un acceleratore. Per esempio, quando $x = 16$ si intende che Enrico o l'elettrone si trovano 16 unità lontano da un posto che chiamiamo zero. La v è la velocità con cui si sta muovendo Enrico (o l'elettrone): diciamo 100 chilometri all'ora nel caso di Enrico e 1 milione di metri al secondo nel caso dell'elettrone. La t rappresenta il tempo trascorso dal momento del «via». Adesso siamo in grado di prevedere dove si troverà la cosa a ogni istante, per $t = 3$ secondi o 16 ore o 100.000 anni. Possiamo anche dire dove si trovava per $t = -7$ secondi (cioè 7 secondi prima di $t = 0$) o $t = -1$ milione di anni. In altri termini, se Enrico parte dal vialetto davanti a casa vostra e guida per un'ora esattamente in direzione est alla velocità di 100 chilometri orari, allora è ovvio che un'ora dopo il «via» si troverà a 100 chilometri a est del vostro vialetto. Viceversa, potete anche calcolare dove si trovava Enrico un'ora prima (– 1 ora), assumendo che la sua velocità sia sempre stata v e che v sia nota (un'assunzione critica dal momento che, se Enrico è un beone, potrebbe essersi fermato al Joe's Bar un'ora fa).

Richard Feynman illustra la sottigliezza dell'equazione in un altro modo. Nella sua versione, un poliziotto ferma una donna in una familiare, si avvicina al finestrino e ringhia: «Non sapeva che stava andando a cento all'ora?».

«Non sia ridicolo» risponde la donna, «sono venuta via da casa solo quindici minuti fa.» Feynman, pensando di aver inventato un modo divertente di introdurre il calcolo differenziale, rimase estremamente colpito quando fu accusato di essere un sessista per aver raccontato questa storiella, e così non ve la racconterò nemmeno io.

Il punto essenziale della nostra piccola escursione nel territorio della matematica è che le equazioni hanno delle soluzioni, e che queste soluzioni possono essere confrontate con il «mondo reale» della misurazione e dell'osservazione. Se l'esito di questo confronto è positivo, la fiducia nella legge originale aumenta. Vedremo, di tanto in tanto, che le soluzioni non concordano sempre con l'osservazione e le misurazioni, nel qual caso, dopo opportuni controlli e verifiche, la «legge» da cui sono emerse le soluzioni viene relegata nella pattumiera della storia. A volte, le soluzioni delle equazioni che esprimono una legge di natura sono del tutto bizzarre e inaspettate, e fanno perciò cadere in sospetto la teoria. Se successive osservazioni mostrano che, dopotutto, essa era giusta, noi ne gioiamo. Qualunque sia il risultato, sappiamo che le verità supreme dell'universo, così come il funzionamento di un circuito di risonanza elettrica o le vibrazioni di una struttura in travi d'acciaio, sono tutte espresse nel linguaggio della matematica.

* L'oui-ja è una tavola che reca impressi lettere dell'alfabeto e altri segni, impiegata nelle pratiche occulte e medianiche per ottenere messaggi dall'aldilà. (*NdT*)

L'universo ha solo pochi secondi (10^{18})

Un'altra cosa a proposito dei numeri. Il nostro argomento slitta spesso dal mondo dell'infinitamente piccolo al mondo dello straordinariamente grande. Avremo dunque a che fare con numeri che sono spesso molto, molto grandi, oppure molto, molto piccoli. Così li scriverò, per la maggior parte, usando la notazione scientifica. Per esempio, invece di scrivere un milione come 1.000.000 lo scriverò così: 10^6, che significa: 10 elevato alla sesta, cioè un 1 seguito da sei zeri, che è, approssimativamente, il costo in dollari di circa 20 secondi d'esercizio del governo degli Stati Uniti. Anche i grandi numeri che non cominciano con 1 si possono scrivere in notazione scientifica. Per esempio, 5.500.000 si scrive $5{,}5 \times 10^6$. Con numeri molto piccoli non facciamo che inserire un segno meno. Un milionesimo (1/1.000.000) si scrive così: 10^{-6}, che significa un 1 che si trova sei posti a destra della virgola, ovverossia 0,000001.

Ciò che importa è capire la scala di grandezza di questi numeri. Uno degli svantaggi della notazione scientifica è che essa nasconde la reale immensità (o piccolezza) dei numeri. L'estensione dei tempi scientificamente rilevanti è qualcosa di spaventoso: 10^{-1} secondi è un batter d'occhi; 10^{-6} secondi è la durata della vita della particella muone e 10^{-23} secondi è il tempo che un fotone, una particella di luce, impiega ad attraversare il nucleo. Tenete presente che procedere per potenze di dieci fa esplodere tremendamente le cifre. Così, 10^7 secondi corrisponde a un po' più di quattro mesi, e 10^9 secondi a trent'anni. Ma 10^{18} secondi è approssimativamente l'età dell'universo, la quantità di tempo trascorsa dal Big Bang. I fisici la misurano in secondi, un mucchio di secondi.

Il tempo non è la sola quantità che varia dall'infinitamente piccolo all'infinitamente grande. La più piccola distanza di cui si tiene conto attualmente nelle misurazioni è qualcosa dell'ordine dei 10^{-17}

centimetri, che corrisponde al percorso che una cosa chiamata Z^0 (zeta zero) può compiere prima di lasciare il nostro mondo. I teorici trattano talvolta con concetti di spazio molto più piccoli; per esempio, quando parlano di superstringhe, una teoria delle particelle di moda ma molto astratta e ipotetica, dicono che la grandezza di una superstringa è di 10^{-35} centimetri, davvero piccola. All'estremo opposto, la distanza più grande è il raggio dell'universo osservabile, un po' meno di 10^{28} centimetri.

La storia delle due particelle e la T-shirt definitiva

Quando avevo dieci anni mi presi il morbillo e mio padre, per distrarmi, mi regalò un libro stampato in grande, *L'evoluzione della fisica* di Albert Einstein e Leopold Infeld. Non dimenticherò mai l'inizio di questo libro. Parlava di romanzi gialli e di come ogni racconto poliziesco abbia un mistero, degli indizi e un investigatore. L'investigatore cerca di risolvere il mistero usando gli indizi.

Ci sono sostanzialmente due misteri da risolvere nella storia che segue. Entrambi si manifestano come particelle. Il primo è il lungamente ricercato a-tomo, la particella di materia invisibile e indivisibile postulata per la prima volta da Democrito. L'a-tomo si trova al centro dei problemi fondamentali della fisica delle particelle.

Abbiamo cercato di risolvere questo mistero per 2500 anni. Ci sono migliaia di indizi, ognuno dei quali scoperto con un lavoro minuzioso. Nei primi capitoli vedremo come i nostri predecessori hanno tentato di risolvere il rompicapo. Sarete sorpresi nel vedere quante idee «moderne» si trovano nei secoli XVI e XVII, e addirittura alcuni secoli prima di Cristo. Alla fine torneremo al presente, a inseguire un secondo, forse anche più grande mistero rappresentato dalla particella che io credo orchestri la sinfonia cosmica. Nel corso del libro avrete modo di vedere la naturale parentela fra un matematico del Seicento che lasciava cadere dei pesi da una torre a Pisa e un fisico delle particelle del giorno d'oggi, che si congela le dita in una baracca sulla fredda prateria spazzata dal vento dell'Illinois mentre controlla i dati che scaturiscono da un acceleratore da mezzo miliardo di dollari sepolto nel terreno gelato. Entrambi si pongono le stesse domande. Qual è la struttura fondamentale della materia? Come funziona l'universo?

Al tempo della mia infanzia nel Bronx stavo a guardare per ore mio fratello maggiore che giocava con Il piccolo chimico. Era un mago Io sbrigavo tutti i lavori di casa purché mi lasciasse assistere ai

suoi esperimenti. Oggi si dedica al commercio delle novità. Vende cose tipo cuscini che gridano evviva, targhe per tifosi e T-shirt con slogan di facile presa. Queste ultime consentono alle persone di riassumere la propria concezione del mondo in una frase non più ampia del loro petto. La scienza dovrebbe avere uno scopo non meno elevato. La mia ambizione è di vivere abbastanza da vedere tutta la fisica ridotta a un formula così semplice ed elegante da potersi scrivere facilmente su una T-shirt.

Nel corso dei secoli si sono fatti dei notevoli progressi nella ricerca della T-shirt definitiva. Newton, per esempio, ha scoperto la gravità, una forza che spiega una quantità impressionante di fenomeni disparati: le maree, la caduta di una mela, le orbite dei pianeti e la formazione delle galassie. La T-shirt di Newton porta scritto $F = ma$. Successivamente, Michael Faraday e James Clerk Maxwell hanno svelato il mistero dello spettro elettromagnetico. Essi hanno scoperto che elettricità, magnetismo, luce solare, onde radio e raggi X sono tutte manifestazioni della stessa forza. Ogni libreria universitaria che si rispetti vi venderà una T-shirt con le equazioni di Maxwell.

Oggi, molte particelle dopo, abbiamo il modello standard che riduce tutta la realtà a circa una dozzina di particelle e quattro forze. Il modello standard rappresenta tutti i dati che sono stati forniti da tutti gli acceleratori a cominciare dalla Torre di Pisa. Esso organizza particelle chiamate quark e leptoni – sei di ciascun tipo – in un'elegante configurazione tabulare. Si può rappresentare l'intero modello standard su una T-shirt, anche se la scritta risulterà molto fitta. È una semplicità conquistata con difficoltà, generata da un esercito di fisici che hanno battuto la stessa strada. E tuttavia la T-shirt «modello standard» bara. Con le sue dodici particelle e quattro forze è considerevolmente precisa. Ma è anche incompleta e, di fatto, intrinsecamente incoerente. Trovare sulla T-shirt lo spazio per produrre succinte giustificazioni di tali incoerenze richiederebbe una taglia *extra-large*, e saremmo ancora costretti a uscire dalla T-shirt.

Chi o che cosa ci sbarra la strada, ostacolando la nostra ricerca della T-shirt perfetta? Questo ci riporta al nostro secondo mistero. Prima di poter portare a termine il compito intrapreso dagli antichi Greci, dobbiamo considerare la possibilità che la nostra preda lasci in giro dei falsi indizi per confonderci. A volte, come una spia in un romanzo di John Le Carré, lo sperimentatore deve tendere una trappola. Deve costringere il colpevole a esporsi.

Il misterioso Mister Higgs

Attualmente, i fisici delle particelle stanno tendendo questa trappola. Stiamo costruendo un tunnel di ottantasette chilometri di circonferenza che conterrà i due tubi a fasci del Super Collisore Superconduttore (SSC) in cui speriamo di intrappolare il nostro cattivo.

E che cattivo! Il più cattivo di ogni tempo. Noi pensiamo che vi sia uno spettro che si aggira per l'universo, che ci impedisce di capire la reale natura della materia. È come se qualcosa, o qualcuno, volesse precluderci il raggiungimento della conoscenza definitiva.

La barriera invisibile che ci impedisce di conoscere la verità si chiama «campo di Higgs». I suoi gelidi tentacoli si estendono in ogni angolo dell'universo e le sue implicazioni scientifiche e filosofiche producono dei grossi bernoccoli sulla testa dei fisici. Il campo di Higgs compie le sue stregonerie mediante – e che altro, se no? – una particella. Questa particella va sotto il nome di «bosone di Higgs». Il bosone di Higgs è uno dei motivi fondamentali per costruire il Super Collisore. Solo l'SSC svilupperà l'energia necessaria a produrre e scoprire il bosone di Higgs, o così almeno crediamo. Questo bosone è di importanza così capitale per lo stato odierno della fisica, così cruciale per la nostra comprensione finale della struttura della materia, e tuttavia così elusivo, che gli ho dato un soprannome: «particella di Dio». Perché «particella di Dio»? Per due ragioni. Una è che l'editore non avrebbe mai acconsentito a chiamarla «particella maledetta da Dio», anche se si tratterebbe di un titolo più appropriato, vista la sua natura malvagia e le spese che sta comportando. L'altra è che vi è una connessione con un altro libro, *molto* più antico...

La torre e l'acceleratore

E in tutta la terra vi era un solo linguaggio e un solo discorso.

E avvenne, nel loro vagare dalla parte di oriente, che gli uomini trovarono una pianura nel paese di Sennaar, vi si stabilirono e si dissero l'un l'altro: «Orsù! Facciamoci dei mattoni di argilla e cuociamoli al fuoco». Il mattone servì loro invece della pietra e il bitume invece della malta. Poi essi dissero: «Orsù! Costruiamo a nostro vantaggio una città con una torre la cui cima *giunga* fino ai cieli, e facciamoci un nome, per non essere dispersi sulla superficie di tutta la terra».

Ma il Signore discese per vedere la città con la torre che stavano costruendo i figli dell'uomo. E il Signore disse: «Ecco ch'essi *sono* un sol popolo e un solo linguaggio è per tutti loro; questo è il loro inizio nelle imprese; ormai tutto ciò che hanno meditato di fare non sarà loro im-

possibile. Orsù! Discendiamo e confondiamo laggiù il loro linguaggio, così che essi non comprendano più il linguaggio l'uno dell'altro».

Il Signore li disperse di là sulla superficie di tutta la terra ed essi cessarono di costruire la città. Per questo il suo nome fu detto Babele.

Genesi, 11, 1-9

Una volta, molte migliaia di anni fa, molto prima che fossero scritte queste parole, la natura parlava un solo linguaggio. La materia era ovunque la stessa, bella nella sua elegante, incandescente simmetria. Ma, con il passare dei millenni, essa si è trasformata, si è diffusa nell'universo in molte forme diverse, confondendo quelli di noi che vivono su questo comune pianeta in orbita intorno a una mediocre stella.

Nella ricerca umana di una comprensione razionale del mondo ci sono stati dei periodi in cui il progresso era rapido, le scoperte abbondavano e gli scienziati erano pieni di ottimismo. In altri periodi ha regnato la più totale confusione. Gli stessi periodi di maggior confusione, di crisi intellettuale e incomprensione totale sono stati spesso forieri delle illuminanti scoperte a venire.

Negli ultimi decenni la fisica delle particelle ha attraversato un periodo di tensione intellettuale talmente curioso che la parabola della Torre di Babele sembra appropriata. I fisici delle particelle hanno usato i loro acceleratori giganti per sezionare le parti e i processi dell'universo. In anni recenti, la ricerca è stata aiutata da astronomi e astrofisici che scrutano, in senso figurato, il cielo attraverso telescopi giganti alla ricerca di braci e ceneri residue di un'esplosione catastrofica che sarebbe avvenuta 15 miliardi di anni fa e che essi chiamano «Big Bang».

Sia gli uni sia gli altri hanno contribuito al progresso verso un modello semplice, coerente e onnicomprensivo che spiegherà tutto: la struttura della materia e dell'energia, il comportamento delle forze in ambiti che vanno dai primi attimi di vita dell'universo, con la sua eccezionale temperatura e densità, al mondo relativamente freddo e vuoto che conosciamo oggi. Stava andando tutto liscio, forse troppo liscio, quando siamo incappati in una stranezza, una forza apparentemente contraria presente nell'universo. Qualcosa che sembra schizzare fuori dallo spazio pervasivo in cui sono incorporati i nostri pianeti, stelle e galassie. Qualcosa che non possiamo ancora scoprire e che, si potrebbe dire, è stato messo lì per saggiare le nostre capacità e confonderci. Ci stavamo avvicinando troppo? C'è forse un suscettibile Grande Mago di Oz che manipola malevolmente i reperti?

Il problema è se i fisici rimarranno disorientati da questo rompicapo o se, a differenza degli infelici Babilonesi, continueranno a costruire la Torre e, per dirla con Einstein, a «conoscere la mente di Dio».

> E in tutto l'universo vi era una moltitudine di linguaggi e di discorsi.
> E avvenne, nel loro vagare dalla parte di oriente, che gli uomini trovarono una pianura nel paese di Waxahachie, vi si stabilirono e si dissero l'un l'altro: «Orsù! Costruiamo a nostro vantaggio un collisore gigante le cui collisioni possano risalire all'inizio del tempo». Ed ebbero magneti superconduttori da far girare e protoni da frantumare.
> Ma il Signore discese per vedere l'acceleratore costruito dai figli dell'uomo. E il Signore disse: «Ecco che stanno cercando di rendere meno confusa la mia confusione». E il Signore sospirò e disse: «Orsù! Discendiamo e diamogli la particella di Dio, così che possano vedere la bellezza dell'universo che ho creato».
>
> *Nuovissimo Testamento*, 11,1

II
Il primo fisico delle particelle

> Sembrò sorpreso. «Ha trovato un coltello che può tagliare un atomo?» chiese. «In *questa* città?»
> Accennai di sì col capo. «Siamo seduti proprio adesso sulla nervatura principale» dissi.
>
> (*Con tante scuse a Hunter S. Thompson*)

Chiunque può percorrere in macchina (o a piedi o in bicicletta) il Fermilab, anche se si tratta del più sofisticato laboratorio scientifico del mondo. Moltissimi servizi federali contribuiscono a preservarne la privacy. Ma il compito del Fermilab è di scoprire segreti, non di mantenerli. Durante i radicali anni Sessanta, la Commissione per l'energia atomica (AEC) raccomandò a Robert R. Wilson, il mio predecessore e fondatore del laboratorio, di formulare un piano per arrestare gli studenti contestatori se fossero arrivati alle porte del Fermilab. Il piano di Wilson era semplice. Egli disse all'AEC che avrebbe affrontato i contestatori da solo, armato di un'unica arma: una lezione di fisica. Garantì alla commissione che quest'arma sarebbe stata abbastanza letale da disperdere anche i sobillatori più arrabbiati. Da allora i direttori del laboratorio tengono sottomano una lezione per i casi d'emergenza. Preghiamo il cielo di non dover mai essere costretti a servircene.

Il Fermilab si estende su circa 3000 ettari di terreno agricolo convertito, otto chilometri a est di Batavia, Illinois, a circa un'ora di macchina a ovest di Chicago. All'ingresso di Pine Street sta una gigantesca scultura d'acciaio creata da Robert Wilson, che, oltre a essere il primo direttore, fu praticamente l'artefice della costruzione del Fermilab, un trionfo artistico, architettonico e scientifico. La scultura, intitolata *Broken Symmetry* (Simmetria infranta), consiste di tre archi che si incurvano verso l'alto, quasi a intersecarsi in un punto a quindici metri d'altezza dal terreno. Essi, tuttavia, non si intersecano, o almeno non in maniera netta. I tre bracci si incontrano, ma in modo quasi accidentale, come se fossero stati costruiti da diversi imprenditori che non si erano messi d'accordo. La scultura presenta qualcosa di stonato, non diversamente dal nostro universo attuale.

Se vi camminate attorno, la gigantesca opera d'acciaio appare asimmetrica da ogni angolazione. Ma, se tornate sui vostri passi direttamente sotto di essa e guardate dritto in alto, godrete della sola visuale dalla quale appare simmetrica. Il capolavoro di Wilson si addice perfettamente al Fermilab, poiché ciò che fanno qui i fisici è cercare indizi di quella che essi sospettano sia una simmetria nascosta in ciò che appare come un universo decisamente asimmetrico.

Come vi inoltrate fra i blocchi, vi imbattete nella più importante struttura del luogo. Wilson Hall, il laboratorio centrale (alto ben sedici piani) del Fermilab, si innalza sul suolo pianeggiante, simile a un'incisione di Dürer che ritrae due mani congiunte in preghiera. La costruzione è stata ispirata da una cattedrale, costruita nel 1225, che Wilson vide a Beauvais, in Francia. La cattedrale di Beauvais presenta due torri attraversate da un chiostro. Wilson Hall, finita nel 1972, consiste di due torri (le due mani in preghiera), congiunte da arcate di parecchi piani, e di uno dei più grandi atri del mondo. All'ingresso vi è una vasca con un grande obelisco a una delle estremità. L'obelisco, il tributo artistico finale di Wilson al laboratorio, è noto a tutti i ricercatori come l'«ultima costruzione di Wilson».

Tangenziale a Wilson Hall vi è la *raison d'être* del laboratorio: l'acceleratore di particelle. Sepolto nove metri sotto la prateria, e disposto in un cerchio di oltre sei chilometri di circonferenza, si trova un tubo d'acciaio inossidabile di soli pochi centimetri di diametro. Esso serpeggia attraverso migliaia di magneti superconduttori che guidano i protoni nella loro traiettoria circolare. Nell'acceleratore si producono collisioni e calore in grandissima quantità. Attraverso questo anello i protoni corrono, a velocità prossime a quelle della luce, verso la loro annichilazione in scontri frontali con i fratelli antiprotoni. Queste collisioni generano delle temperature momentanee di circa 10.000 trilioni (10^{16}) di gradi sopra lo zero assoluto, molto superiori a quelle che si trovano al centro del Sole o nella furiosa esplosione di una supernova. Gli scienziati, qui, sono viaggiatori del tempo più autentici di quelli che trovate nei film di fantascienza. L'ultima volta che queste temperature sono esistite in natura è stata una frazione infinitesimale di secondo dopo il Big Bang, la nascita dell'universo.

Benché si trovi sotto il livello del suolo, l'anello dell'acceleratore si può facilmente vedere dall'alto a causa di un cumulo di terra che lo ricopre per un'altezza di sei metri. (Immaginatevi un sottilissimo pneumatico di oltre sei chilometri di circonferenza.) Molte persone credono che lo scopo del cumulo sia di assorbire le radiazioni emesse dalla macchina; invece è dovuto al fatto che Wilson era una specie di esteta. Dopo tutto il lavoro di costruzione dell'acceleratore, egli era dispiaciuto di non poter dire dov'era. Così, quando gli operai scavarono dei pozzi di raffreddamento intorno all'acceleratore, fece ammucchiare il terriccio in questo immenso circolo. Per dargli maggior risalto, Wilson gli creò attorno un canale di tre metri di larghezza e installò delle pompe circolanti che sprizzano in aria zampilli d'acqua. Il canale svolge una funzione pratica, oltre che estetica: esso convoglia l'acqua fredda per l'acceleratore. Il tutto ha una sua strana bellezza. Nelle foto scattate dai satelliti da cinquecento chilometri d'altezza, cumulo e canale – che da quella distanza appaiono come un cerchio perfetto – si presentano come l'elemento più caratteristico del paesaggio dell'Illinois settentrionale.

I 270 ettari di terreno racchiusi dall'anello dell'acceleratore costituiscono un curioso esempio di regressione. Il laboratorio ripristina la prateria all'interno dell'anello. Molta dell'originaria erba alta della prateria, quasi soffocata da erbe europee nel corso degli ultimi due secoli, è stata ripiantata grazie a parecchie centinaia di volontari che hanno raccolto semi dalla prateria residua nell'area di Chicago. Cigni trombetta, oche del Canada e gru costruiscono il loro nido sulla superficie dei laghetti che punteggiano l'interno dell'anello.

Al di là della strada, a nord dell'anello principale, vi è un altro progetto di recupero, un pascolo dove erra una mandria di circa un centinaio di bufali. La mandria è costituita di capi importati dal Colorado e dal Dakota del Sud, oltre che da alcuni capi indigeni dell'Illinois, anche se i bufali hanno disertato la zona di Batavia per ottocento anni. Prima di allora, le mandrie erano molto diffuse nella prateria dove ora pascolano i fisici. Gli archeologi ci dicono che la caccia al bufalo, sui terreni dove sorge attualmente il Fermilab, risale a novemila anni fa, come testimoniano tutte le punte di freccia trovate nella regione. Sembra che per secoli una tribù di americani nativi, stanziata presso il vicino Fox River, abbia inviato i suoi cacciatori fino a quello che adesso è il Fermilab, dove essi si accampavano, cacciavano gli animali e li riportavano al loro insediamento lungo la riva del fiume.

Alcuni trovano questa presenza dei bufali un po' sconcertante. Una volta, mentre in qualità di ospite al «Phil Donahue Show» stavo pubblicizzando il laboratorio, telefonò una signora che viveva nei pressi della struttura. «Il dottor Lederman» lamentò «parla in modo da far apparire l'acceleratore, tutto sommato, abbastanza innocuo. Se le cose stanno così, perché tengono tutti quei bufali? Lo sappiamo tut-

ti che sono estremamente sensibili ai materiali radioattivi.» La signora pensava che i bufali fossero come i canarini nel pozzo di una miniera di carbone, ma addestrati a scoprire le radiazioni invece dei gas. Probabilmente immaginava che io tenessi un occhio sulla mandria, dal mio ufficio nella torre, pronto a precipitarmi nel parcheggio se uno di essi si fosse abbattuto su un fianco. In realtà, i bufali non sono nient'altro che bufali. Un contatore Geiger funziona molto meglio come rivelatore di radiazioni, e consuma molto meno fieno.

Dirigetevi a est su Pine Street, allontanandovi da Wilson Hall, e incontrerete molti altri importanti impianti, compreso l'impianto del rivelatore di collisioni (CDF), studiato per compiere la maggior parte delle nostre scoperte sulla materia, e il recente Richard P. Feynman Computer Center, dal nome del grande teorico del Cal Tech scomparso da appena pochi anni. Procedete ancora, e finalmente arriverete a Eola Road. Girate a destra e andate diritto per circa un chilometro e mezzo e vedrete, sulla sinistra, una fattoria vecchia di 150 anni. Qui ho vissuto quand'ero direttore: 137 Eola Road. Non si tratta di un indirizzo ufficiale. È soltanto il numero che ho scelto di mettere sulla casa.

Fu Richard Feynman, infatti, a suggerire che tutti i fisici affiggessero una targhetta nei loro uffici o nelle loro abitazioni per ricordarsi di quanto poco sappiamo. Sulla targhetta non ci sarebbe stato altro che questo: 137. Ora, 137 è l'inverso di una cosa chiamata «costante di struttura fine». Questo numero è in relazione con la probabilità che un elettrone possa emettere o assorbire un fotone. La costante di struttura fine risponde anche al nome di «costante alfa» e corrisponde al quadrato della carica dell'elettrone diviso per la velocità della luce moltiplicato per la costante di Planck. L'unico significato di tale sproloquio è che questo numero, 137, contiene l'essenziale dell'elettromagnetismo (l'elettrone), della relatività (la velocità della luce) e della teoria dei quanti (la costante di Planck). Sarebbe meno sconvolgente se il rapporto fra tutti questi importanti concetti risultasse pari a 1 o a 3 o, forse, a un multiplo di π. Ma 137?

La cosa più notevole a proposito di questo notevole numero è che esso è privo di dimensioni. La velocità della luce si aggira sui 300.000 chilometri al secondo. Abraham Lincoln era alto quasi due metri. Molti numeri si presentano con dimensioni. Ma risulta che, quando combiniamo le quantità che costituiscono la costante alfa, tutte le unità si cancellano! 137 si presenta da solo; si presenta ovunque in tutta la sua spoglia nudità. Ciò significa che gli scienziati di Marte o del quattordicesimo pianeta della stella Sirio, usando qualsiasi accidente di unità per la carica e la velocità e la loro versione della costante di Planck, otterranno sempre 137. Si tratta di un numero puro.

I fisici si sono scervellati sul 137 per gli ultimi cinquant'anni. Werner Heisenberg affermò una volta che tutti i dilemmi della meccanica quantistica si sarebbero risolti non appena si fosse finalmente spiegato il 137. Io dico sempre ai miei studenti che, se capitasse mai loro di trovarsi nei guai in una grande città di qualsiasi parte del mondo, dovrebbero scrivere «137» su una targhetta e appenderla all'angolo di una strada trafficata. Prima o poi un fisico si accorgerà che sono nei guai e accorrerà in loro aiuto. (Per quanto ne so, nessuno ci ha mai provato, ma dovrebbe funzionare.)

Una delle più belle (ma non confermate) storielle della fisica sottolinea l'importanza del 137 e illustra, al tempo stesso, l'arroganza degli scienziati teorici. Secondo questa storiella, un celebre fisico matematico austriaco di origine svizzera, Wolfgang Pauli, arriva in Paradiso e, in considerazione della sua eminenza come fisico, gli viene concessa un'udienza con Dio.

«Pauli, ti è permessa una domanda. Che cosa vuoi sapere?»

Pauli pone immediatamente la domanda che lo ha travagliato negli ultimi dieci anni della sua vita. «Perché alfa è uguale a uno su centotrentasette?»

Dio sorride, prende in mano il gesso e comincia a scrivere equazioni alla lavagna. Dopo qualche minuto si volta verso Pauli, che agita la mano. «*Das ist falsch!* (Sono tutte balle!)»

C'è però anche una storia vera – una storia verificabile – che accadde qui, sulla terra. Pauli era, infatti, ossessionato dal 137 e passava innumerevoli ore a meditare sul suo significato. Il numero lo tormentò fino alla fine. Quando il suo assistente si recò a fargli visita nella stanza d'ospedale dove era ricoverato prima della fatale operazione, Pauli gli chiese di notare il numero sulla porta mentre se ne andava. Il numero della stanza era 137.

Ecco dove ho vissuto: 137 Eola Road.

A notte fonda con Lederman

Tornando a casa una domenica notte, dopo una cena a Batavia, guidavo attraverso i terreni del laboratorio. Da diversi punti di Eola Road si può vedere la costruzione del laboratorio centrale stagliarsi contro il cielo della prateria. Wilson Hall, alle undici e mezzo di una domenica notte, è un'eloquente testimonianza della dedizione con

cui i fisici si impegnano a risolvere i misteri dell'universo ancora insoluti. Le luci punteggiavano i sedici piani delle due torri, ciascuna delle quali conteneva la sua parte di ricercatori con gli occhi appannati, che cercavano di risolvere le anomalie delle nostre oscure teorie sull'energia e la materia. Fortunatamente, io potevo andare a casa e mettermi a letto. Come direttore del laboratorio, i miei obblighi notturni erano drasticamente ridotti. Potevo dormire sopra i problemi, invece di lavorare su di essi. Ero felice, quella notte, di potermi sdraiare su un vero letto, invece di dovermi buttare alla meglio sul pavimento dell'acceleratore aspettando la fuoruscita dei dati. Nondimeno, mi voltai e rivoltai pensando ai quark, a Gina, ai leptoni, a Sophia... Finalmente, mi decisi a contare le pecore per allontanare il pensiero dalla fisica: «... 134, 135, 136, 137...».

Tutt'a un tratto balzai fuori dalle coperte e, spinto da un impulso irresistibile, mi catapultai fuori di casa. Spinsi la bicicletta fuori dalla rimessa e, ancora in pigiama e con le medaglie che mi penzolavano dai risvolti, pedalai in modo penosamente lento verso il rivelatore di collisioni. Era veramente frustrante. Sapevo di avere qualche importante affare da sbrigare, ma non potevo assolutamente far sì che la bicicletta si muovesse più in fretta. Allora mi ricordai di ciò che uno psicologo mi aveva detto di recente: che esiste un tipo di sogno, chiamato sogno lucido, in cui il sognatore sa di trovarsi in un sogno. Una volta che si sa questo, aveva detto lo psicologo, si può fare tutto quanto ci pare nel sogno. Il primo passo consiste nello scoprire qualche indizio del fatto che ci si trova in un sogno e non nella vita reale. Questo era facile. Sapevo maledettamente bene che si trattava di un sogno per via del corsivo. Io detesto il corsivo. È troppo difficile da leggere. Presi il controllo del mio sogno. «Via il corsivo!» gridai.

Ecco qua. Così va meglio. Innestai la marcia alta e pedalai alla velocità della luce (ehi, si può fare qualsiasi cosa in un sogno) verso il rivelatore. Oops, troppo veloce: avevo fatto il giro della Terra otto volte per ritrovarmi di nuovo davanti a casa. Moderai la velocità e pedalai dolcemente a duecento all'ora verso l'impianto. Anche alle tre del mattino il parcheggio era quasi pieno; ai laboratori dell'acceleratore i protoni non si fermano al calar della notte.

Fischiettando uno spettrale motivetto, mi addentrai nell'edificio del rivelatore. Il rivelatore è una costruzione simile a un capannone industriale, tutta dipinta di un arancione e un azzurro molto vivaci. I vari uffici, stanze dei computer e stanze di controllo si trovano tutti lungo una parete; il resto dell'edificio è spazio aperto, progettato per ospitare il rivelatore, un arnese di 5000 tonnellate, alto come un palazzo di tre piani. Ci sono voluti circa duecento fisici e quasi altrettanti ingegneri per più di otto anni per montare questo speciale orologio svizzero del peso di 5000 tonnellate. Il rivelatore è variopinto, di forma raggiata, con i suoi componenti che si estendono simmetricamente da un piccolo foro nel centro. È il gioiello del laboratorio. Senza di esso non possiamo «vedere» che cosa accade nel tubo dell'acceleratore, che attraversa nel centro il nucleo del rivelatore. Ciò che accade sono scontri frontali di protoni e antiprotoni. I raggi degli elementi del rivelatore corrispondono grosso modo ai raggi di diffusione di centinaia di particelle prodotte nella collisione.

Il rivelatore è montato su rotaie che consentono all'enorme congegno di spostarsi dal tunnel dell'acceleratore al reparto montaggio per la manutenzione periodica. Di norma programmiamo la manutenzione per i mesi estivi, quando le tariffe elettriche sono più alte (quando la bolletta supera i 10 milioni di dollari all'anno, si fa quel che si può per tagliare le spese). Quella notte il rivelatore era acceso. Era stato riportato nel tunnel e il passaggio di collegamento con la stanza di manutenzione era stato chiuso con una porta d'acciaio di tre metri di spessore che blocca le radiazioni. L'acceleratore è progettato in modo che i protoni e gli antiprotoni collidano (per la maggior parte) nella sezione del tubo che passa attraverso il rivelatore, la «zona di collisione». Il compito del rivelatore è, ovviamente, di rivelare e catalogare i prodotti delle collisioni frontali fra protoni e antiprotoni.

Ancora in pigiama, mi diressi verso la stanza di controllo del secondo piano, dove vengono costantemente monitorizzati i risultati del rivelatore. Come c'era da aspettarsi, data l'ora, la stanza era silenziosa. Non c'erano saldatori né altri operai che scorrazzavano per l'impianto eseguendo riparazioni o altri compiti di manutenzione, come accade solitamente durante il turno di giorno. Come di consueto, le luci nella stanza di controllo erano velate per meglio vedere e leggere il caratteristico bagliore azzurrino di dozzine di monitor. I computer che si trovano nella stanza di controllo del rivelatore sono Macintosh, proprio come i microcomputer che potete comprare per tenere d'occhio le vostre finanze o per giocare a *Cosmic Ozmo*. Essi ricevono le informazioni da un gigantesco computer «fatto in casa» che opera in tandem con il rivelatore per separare le scorie prodotte dalle collisioni fra protoni e antiprotoni. Questo strumento fatto in casa è, in realtà, un sofisticato sistema di acquisizione dei dati, o DAQ, progettato da alcuni dei più brillanti scienziati della quindicina circa d'università nel mondo che hanno collaborato alla costruzione del mostruoso rivelatore. Il DAQ è programmato per decidere quali delle centinaia di migliaia di collisioni che avvengono ogni secondo

siano abbastanza importanti o interessanti da venire analizzate e registrate su nastro magnetico. I Macintosh eseguono il monitoraggio della grande varietà di sottosistemi che raccolgono i dati.

Esaminai la stanza, scrutando le numerose tazze da caffè vuote e il gruppetto di giovani fisici, al tempo stesso eccitati ed esausti: il risultato di troppa caffeina e di turni troppo prolungati. A quest'ora vi si trovano studenti di dottorato o neodottori di ricerca che non hanno sufficiente anzianità per pretendere turni decenti. Notevole era il numero di giovani donne, un articolo raro nella maggior parte dei laboratori di fisica. L'aggressiva politica di reclutamento è perfettamente riuscita a tutto beneficio del gruppo.

Dalla parte opposta della stanza, sedeva un uomo che non sembrava perfettamente a suo agio. Era magro, con la barba incolta. Non appariva molto diverso dagli altri ricercatori, ma in qualche modo sapevo che non era un membro dello staff. Forse era la toga. Sedeva, ridacchiando nervosamente, con lo sguardo fisso allo schermo del Macintosh. Figuratevi un po', ridere nella stanza di controllo del rivelatore! In presenza di uno dei più grandi esperimenti che la scienza abbia mai immaginato! Ritenni mio dovere intervenire.

Lederman: Mi scusi. Lei è il nuovo matematico mandato dall'Università di Chicago?

Tizio in toga: La professione è giusta, la città sbagliata. Il mio nome è Democrito. Vengo da Abdera, non da Chicago. Mi chiamano «il filosofo che ride».

Lederman: Abdera?

Democrito: Una città della Tracia, nella Grecia continentale.

Lederman: Non ricordo di aver fatto venire nessuno dalla Tracia. Qui non abbiamo bisogno di un «filosofo che ride». Al Fermilab ho io il monopolio dell'umorismo.

Democrito: Sì, ho sentito parlare del «direttore che ride». Non si preoccupi. Non credo che mi tratterrò a lungo. Non dopo quel che ho visto finora.

Lederman: Come mai, allora, sta usurpando un posto nella stanza di controllo?

Democrito: Sto cercando qualcosa. Qualcosa di molto piccolo.

Lederman: È capitato nel posto giusto. Il piccolo è la nostra specialità.

Democrito: Così mi hanno detto. Ho cercato questa cosa per duemilaquattrocento anni.

Lederman: Ah, lei è *quel* Democrito.

Democrito: Ne conosce un altro?

Lederman: Capisco. Lei è come l'angelo Clarence di *La vita è una cosa meravigliosa*, mandato qui per distogliermi dal suicidio. In effetti, stavo meditando di tagliarmi le vene. Non riusciamo a trovare il *quark «alto»*.*

Democrito: Suicidio! Mi fa venire in mente Socrate. No, non sono un angelo. Quel concetto di immortalità è successivo alla mia epoca; è stato reso popolare da quel testone di Platone.

Lederman: Ma se non è immortale, come può trovarsi qui? Lei è morto da oltre duemila anni.

Democrito: Ci sono più cose in cielo e in terra, Orazio, di quanto la tua filosofia possa sognare.

Lederman: Suona familiare.

Democrito: L'ho presa in prestito da un tizio che ho incontrato nel XVI secolo. Ma, per rispondere alla sua domanda, sto facendo quello che lei chiamerebbe un viaggio nel tempo.

Lederman: Un viaggio nel tempo? Eravate in grado di immaginare viaggi nel tempo nella Grecia del V secolo a.C.?

Democrito: Il tempo è una bazzecola. Va avanti, va indietro. Lo si può cavalcare a piacere, come fanno i vostri surfisti californiani con le onde del mare. È una cosa difficile da immaginare. Ecco perché abbiamo anche mandato alcuni dei nostri studenti laureati nella vostra epoca. Ho sentito dire che uno di essi, Stephenius Hawking, ha suscitato un certo scalpore. Si è specializzato nel «tempo». Gli abbiamo insegnato noi tutto quello che sa.

Lederman: Perché non avete pubblicato questa scoperta?

Democrito: Pubblicato? Ho scritto sessantasette libri e avrei venduto un bel po' se solo il mio editore non si fosse rifiutato di fare pubblicità. La maggior parte di ciò che sapete di me l'avete appreso dagli scritti di Aristotele. Ma lasci che le dia qualche piccola informazione. Ho viaggiato, ragazzi, se ho viaggiato! Ho fatto più strada di qualsiasi altro uomo del mio tempo, compiendo le più approfondite ricerche, e ho visto più climi e paesi e conosciuto più uomini famosi...

Lederman: Ma Platone la odiava di tutto cuore. È vero che aborriva a tal punto le sue idee da volere che tutti i suoi libri fossero bruciati?

Democrito: Sì, e quel vecchio caprone superstizioso ci è quasi riuscito. E poi quell'incendio ad Alessandria ha bruciato completamente la mia reputazione. Ecco perché voi cosiddetti moderni siete così ignoranti sulla manipolazione del tempo. Adesso non sento parlare altro che di Newton, Einstein...

* Vedi nota a p. IX, alla voce *Quark*. (*NdT*)

Lederman: Dunque, come mai questa visita a Batavia negli anni Novanta?

Democrito: Solo per verificare una delle mie idee, un'idea che fu, sfortunatamente, abbandonata dai miei compatrioti.

Lederman: Scommetto che sta parlando dell'atomo, l'*atomos*.

Democrito: Sì, l'a-tomo, la particella ultima, invisibile e indivisibile. Il mattone di tutta la materia. Ho fatto un salto nel tempo per vedere quanto l'uomo è riuscito a perfezionare la mia teoria.

Lederman: E la sua teoria era...

Democrito: Non mi faccia arrabbiare, giovanotto! Lei sa benissimo come la pensavo. Non dimentichi che ho fatto il salta-tempo, secolo dopo secolo, decennio dopo decennio. So benissimo che i chimici del XIX e i fisici del XX secolo si sono trastullati con le mie idee. Non mi fraintenda, ha tutto il diritto di chiedermelo. Se solo Platone fosse stato altrettanto saggio.

Lederman: Volevo solo sentirlo dalla sua voce. Noi conosciamo le sue opere soprattutto dagli scritti di altri.

Democrito: Molto bene. Lo farò per l'ennesima volta. Se le sembro seccato è solo perché ne ho discusso recentemente con quel tale, Oppenheimer. Le chiedo solo di non interrompermi con tediose fantasticherie sui paralleli tra fisica e induismo.

Lederman: Le piacerebbe sentire la mia teoria sul ruolo della cucina cinese nella violazione della simmetria speculare? È altrettanto valida dell'affermazione che il mondo è fatto di terra, aria, acqua e fuoco.

Democrito: Perché non se ne sta un po' zitto e mi lascia cominciare dall'inizio? Venga qui, prenda una sedia vicino a questo Macintosh e faccia attenzione. Ebbene, per comprendere l'opera mia, e di tutti noialtri atomisti, dobbiamo andare indietro di duemilaseicento anni. Dobbiamo cominciare quasi duecento anni prima della mia nascita, con Talete, che fiorì intorno al 600 a.C. a Mileto, una cittadina di provincia della Ionia, che corrisponde all'attuale Turchia.

Lederman: Anche Talete era un filosofo?

Democrito: Eccome! Egli fu il *primo* filosofo greco. Ma i filosofi della Grecia presocratica sapevano veramente un sacco di cose. Talete era un raffinato matematico e un abile astronomo. Aveva perfezionato la sua educazione in Egitto e in Mesopotamia. Sa che predisse un'eclissi di sole che si verificò alla fine della guerra fra i Lidi e i Medi? Elaborò anche uno dei primi almanacchi – so che oggi lasciate questo compito ai contadini – e insegnò ai nostri marinai come dirigere la rotta di notte servendosi della costellazione dell'Orsa Minore. Fu anche un consigliere politico, un accorto uomo d'affari e un provetto ingegnere. I primi filosofi greci erano rispettati non solo per l'attività estetica delle loro menti, ma anche per le loro arti pratiche, o «scienze applicate», come direste oggi. C'è molta differenza con i fisici d'oggi?

Lederman: Si sa che, di tanto in tanto, facciamo qualcosa di utile. Ma mi dispiace dire che i nostri risultati sono solitamente tenuti in scarsa considerazione, e che pochissimi di noi conoscono il greco.

Democrito: Fortuna allora per lei che io parlo inglese, non è vero? A ogni modo, Talete cominciò, come me, a porsi una domanda fondamentale: «Di che cosa è fatto il mondo, e come funziona?». Vediamo intorno a noi un caos apparente. I fiori sbocciano, poi muoiono. Le inondazioni devastano la terra. I laghi diventano deserti. Le meteore precipitano dal cielo. Le trombe d'aria sembrano formarsi dal nulla. Di tanto in tanto esplode una montagna. Gli uomini invecchiano e diventano polvere. C'è qualcosa di permanente, un'identità sottostante, che persiste attraverso questo continuo mutamento? Tutto questo si può ridurre a regole così semplici che le nostre piccole menti possano capirle?

Lederman: E Talete diede una risposta?

Democrito: L'acqua. Talete disse che l'acqua era l'elemento ultimo e fondamentale.

Lederman: Come avrà fatto a venirgli in mente?

Democrito: Non è un'idea così folle. Non sono molto sicuro di che cosa pensasse Talete. Ma riflettiamo: l'acqua è essenziale alla crescita, almeno a quella delle piante. I semi hanno una natura umida. Quasi tutto emana acqua quando viene riscaldato. E l'acqua è la sola sostanza conosciuta che può esistere allo stato solido, liquido o gassoso, come vapore acqueo. Forse egli immaginava che l'ulteriore prosecuzione di questo processo potesse trasformare l'acqua in terra. Non so. Ma la filosofia di Talete fu un grandissimo inizio per quella che voi chiamate scienza.

Lederman: Non male come primo tentativo.

Democrito: L'impressione, nei dintorni dell'Egeo, è che Talete e soci abbiano ricevuto un cattivo servizio dagli storici, specialmente da Aristotele. Aristotele era ossessionato dalle forze, dalla causalità. Non gli si poteva quasi parlare d'altro, e perseguitò con le sue critiche Talete e i suoi amici di Mileto. Perché l'acqua? Quale forza causa la trasformazione dell'acqua solida in acqua eterea? Perché tante e diverse forme d'acqua?

Lederman: Nella fisica moderna, ehm, nella fisica di oggi, sono necessarie le forze oltre a...

Democrito: Talete e la sua cerchia potrebbero aver incorporato la nozione di causa nella natura stessa della loro materia fondata sull'acqua. Forza e materia unificate! Riserviamoci questo argomento per dopo. Allora, può parlarmi di ciò che chiamate gluoni, supersimmetria e...

Lederman (*grattandosi furiosamente la sommità del cranio*): Ah, e cos'altro ha fatto questo genio?

Democrito: Aveva alcune idee di un misticismo convenzionale. Credeva che la Terra galleggiasse sull'acqua e che le calamite avessero un'anima, dal momento che possono attrarre il ferro. Ma credeva nella semplicità, nell'esistenza di un'unità nell'universo al di là della grande varietà di «cose» materiali che ci circonda. Talete combinò un insieme di argomenti razionali con ogni sorta di credenze mitologiche che davano all'acqua un ruolo particolare.

Lederman: Suppongo che Talete credesse che il mondo era sostenuto da Atlante in piedi su una tartaruga.

Democrito: Al contrario. Talete e i suoi amici tennero un'importantissima riunione, probabilmente nel retro di un ristorante del centro di Mileto. Dopo aver bevuto un bel po' di vino egiziano, buttarono fuori Atlante e fecero un solenne giuramento: «Da oggi in poi, spiegazioni e teorie su come funziona il mondo saranno strettamente basate su argomentazioni logiche. Niente più superstizione. Niente più appelli ad Atena, Zeus, Ercole, Ra, Buddha, Lao-tzu. Vediamo se riusciamo a cavarcela da soli». Si può pensare che questo sia stato il giuramento più importante che sia mai stato fatto dagli uomini. Era il 600 a.C., probabilmente un giovedì sera, e segnò la nascita della scienza.

Lederman: Pensa proprio che abbiamo fatto piazza pulita della superstizione? Ha conosciuto i nostri creazionisti? I nostri estremisti della Lega per i diritti degli animali?

Democrito: Qui al Fermilab?

Lederman: No, ma poco lontano. Ma mi dica, quando venne fuori questa idea di terra, aria, acqua e fuoco?

Democrito: Freni la sua impazienza. Ci sono stati altri due tizi prima della nascita di quella teoria. Uno è Anassimandro, un collega più giovane di Talete a Mileto. Anche Anassimandro si conquistò fama e onori con iniziative pratiche, come disegnare una carta del mar Nero per i marinai milesi. Come Talete, anch'egli cercò un mattone fondamentale costitutivo della materia, ma decise che non poteva trattarsi dell'acqua.

Lederman: Un altro grande progresso del pensiero greco, senza dubbio. Qual era il *suo* candidato?

Democrito: Rida pure. Arriveremo abbastanza presto alle *vostre* teorie. Anassimandro era un altro genio pratico e, come il suo mentore Talete, impiegava il tempo libero nelle discussioni filosofiche. La logica di Anassimandro era abbastanza sottile. Egli pensava che il mondo fosse costituito di contrari in lotta fra loro, caldo e freddo, secco e umido. L'acqua spegne il fuoco; il sole asciuga l'acqua, eccetera. Perciò la sostanza primaria dell'universo non può essere l'acqua o il fuoco o qualsiasi altra cosa caratterizzata da uno di questi contrari. Qui manca qualsiasi simmetria. E lei sa quanto i Greci amassero la simmetria. Per esempio se, come aveva sostenuto Talete, tutta la materia fosse originariamente costituita d'acqua, allora non potrebbero mai generarsi il calore o il fuoco, poiché l'acqua non genera il fuoco ma lo annienta.

Lederman: Che cosa propose dunque come sostanza primaria?

Democrito: La chiamò *apeiron*, che vuol dire «indefinito». Questo stato primario della materia era una massa indifferenziata di proporzioni enormi, forse infinite. Era la «sostanza» primigenia, neutrale fra i contrari. Questa idea influenzò profondamente il mio pensiero.

Lederman: Così questo *apeiron* assomigliava al suo a-tomo, tranne che per il fatto che si trattava di una sostanza infinita anziché di una particella infinitesimale? Questo non ha soltanto creato confusione?

Democrito: No, Anassimandro mirava a qualcosa. L'*apeiron* era infinito, sia nello spazio sia nel tempo, ma era anche privo di struttura; non aveva parti componenti. Non era nient'altro, assolutamente, che *apeiron*. E, se si vuole stabilire una sostanza primaria, è preferibile che abbia questa qualità. In effetti, il mio obiettivo è quello di metterla in imbarazzo notando che, dopo oltre duemila anni, state finalmente cominciando ad apprezzare la prescienza dei miei amici. Ciò che fece Anassimandro fu inventare il vuoto. Credo che il vostro P.A.M. Dirac abbia finalmente cominciato a dare al vuoto le proprietà che gli competevano negli anni Venti. L'*apeiron* di Anassimandro era il prototipo del mio «vuoto», un nulla in cui si muovono le particelle. Isaac Newton e James Clerk Maxwell lo chiamarono «etere».

Lederman: Ma che cosa diceva della sostanza, della materia?

Democrito: Stia a sentire (*estrae un rotolo di pergamena dalla toga e inforca un paio di occhiali MagnaVision del tipo economico*). Dice Anassiman-

dro: «Esso non è né l'acqua né un altro dei cosiddetti elementi, ma un'altra natura infinita da cui provengono tutti i cieli e i mondi che sono in essi. Le cose si risolvono di nuovo in ciò da cui provengono... i contrari già contenuti nel sostrato si separano». Ebbene, so che i vostri signori del XX secolo parlano continuamente di materia e antimateria creata nel vuoto, e che anche si annienta...

Lederman: Senz'altro, ma...

Democrito: Quando Anassimandro afferma che i contrari erano già contenuti nell'*apeiron* – lo si chiami «vuoto» o «etere» – e successivamente si separarono, questo non è qualcosa di simile a ciò che lei pensa?

Lederman: In certo modo, ma io sono molto più interessato a sapere che cosa ha spinto Anassimandro a elaborare una tale concezione.

Democrito: Naturalmente, egli non anticipò l'antimateria. Tuttavia, pensò che, in un vuoto con le caratteristiche appropriate, i contrari potevano separarsi: caldo e freddo, secco e umido, dolce e amaro. Oggi si aggiunge positivo e negativo, nord e sud. Quando essi si combinano, annullano le loro proprietà nell'*apeiron* neutro. Non è un'idea semplice e chiara?

Lederman: Come la distinzione fra un democratico e un repubblicano? C'era un greco di nome *Republicas*?

Democrito: Molto divertente. Almeno Anassimandro cercò di spiegare il meccanismo che crea la diversità a partire da un elemento primordiale. E la sua teoria portò a un sottogenere di credenze, alcune delle quali potreste anche condividere. Per esempio, Anassimandro credeva che l'uomo si fosse evoluto dagli animali inferiori, che provenivano a loro volta da creature marine. La sua grande idea cosmologica era di eliminare non solo Atlante, ma anche l'oceano di Talete che fa da sostegno alla Terra. Egli sapeva che non c'era bisogno di sostegni. Si immagini la Terra (che non aveva ancora una forma sferica) sospesa nello spazio infinito. Non vi è nessun posto in cui andare. In completo accordo con le leggi di Newton se, come pensavano questi Greci, non esisteva nient'altro. Anassimandro immaginava anche che dovesse esserci più di un mondo, o universo. Egli affermò infatti che esisteva una serie infinita di universi, tutti soggetti a perire, che si susseguivano l'uno all'altro.

Lederman: Come gli universi alterni di *Star Trek*?

Democrito: Lasciamo perdere i prodotti delle vostre TV commerciali. L'idea dell'esistenza di innumerevoli mondi diventò molto importante per noi atomisti.

Lederman: Aspetti un minuto. Ricordo qualcosa, che lei ha scritto, che mi ha fatto venire i brividi alla luce della moderna cosmologia. L'ho anche imparato a memoria. Vediamo: «Ci sono innumerevoli mondi di diversa grandezza. In alcuni non vi è né sole né luna, in altri sono più grandi che nel nostro, e altri mondi hanno più di un sole e più di una luna».

Democrito: Sì, noi condividevamo alcune idee del vostro Capitano Kirk. Ma ci vestivamo molto meglio. Preferirei piuttosto paragonare la mia idea agli universi a bolle su cui, in questi giorni, i vostri cosmologi inflazionari stanno pubblicando fior di articoli.

Lederman: Questo è il motivo per cui sono rimasto perplesso. Non c'era uno dei suoi predecessori che credeva che l'aria fosse l'elemento primordiale?

Democrito: Sta pensando ad Anassimene, un collega più giovane di Anassimandro, l'ultimo della banda di Talete. Egli, in effetti, fece un passo indietro rispetto ad Anassimandro e disse, come Talete, che c'era un elemento primordiale comune, solo che lo identificò con l'aria, non con l'acqua.

Lederman: Avrebbe dovuto dare ascolto al suo mentore; allora avrebbe eliminato una cosa così terrena come l'aria.

Democrito: Sì, ma Anassimene escogitò un ingegnoso meccanismo per spiegare come varie forme di materia si originano trasformandosi da questa sostanza primaria. Capisco da quel che ho letto che lei è uno di quegli sperimentalisti.

Lederman: Be', c'è qualche problema?

Democrito: Ho notato il suo sarcasmo verso così gran parte del pensiero greco. Ho il sospetto che il suo pregiudizio venga dal fatto che molte di queste idee, pur essendo plausibilmente suggerite dal mondo che ci circonda, non si prestano a un'incisiva verifica sperimentale.

Lederman: Verissimo. Gli sperimentatori desiderano ardentemente idee che possano essere verificate. È così che ci guadagniamo da vivere.

Democrito: Può dunque avere più rispetto per Anassimene, visto che le sue idee erano fondate sull'osservazione. Egli teorizzò che i vari elementi della materia si originassero separandosi dall'aria per condensazione e rarefazione. L'aria può ridursi a vapore condensato e viceversa. Caldo e freddo trasformano l'aria in diverse sostanze. Per dimostrare come il calore sia connesso alla rarefazione e il freddo alla condensazione, Anassimene consigliava di effet-

tuare questo esperimento: alitate con le labbra socchiuse e l'aria verrà fuori fredda. Ma se aprite la bocca, l'alito sarà più caldo.

Lederman: Anassimene sarebbe piaciuto al Congresso. I suoi esperimenti sono più a buon mercato dei miei. E tutta quell'aria calda...

Democrito: Me ne rendo conto, ma volevo dissipare il suo pregiudizio che noi Greci antichi non facessimo mai esperimenti. Il problema principale è che pensatori come Talete e Anassimene erano convinti che le sostanze possano trasformarsi: l'acqua può diventare terra; l'aria può diventare fuoco. Ma questo non può accadere. Questa difficoltà della nostra prima filosofia non fu realmente affrontata finché non sopraggiunsero due dei miei contemporanei, Parmenide ed Empedocle.

Lederman: Empedocle è quello di terra, aria, eccetera, non è vero? Mi parli un po' di Parmenide.

Democrito: Parmenide è chiamato spesso il padre dell'idealismo perché il suo pensiero è stato in gran parte plagiato da quell'imbecille di Platone, ma in effetti fu un materialista integrale. Egli parlò parecchio dell'Essere, ma questo Essere era materiale. Parmenide sosteneva, in sostanza, che l'Essere non può nascere né perire. L'esistenza della materia non è, semplicemente, soggetta a fluttuazioni. C'è, e non possiamo distruggerla.

Lederman: Scendiamo nell'acceleratore e le mostrerò quanto si sbagliava. Noi creiamo e distruggiamo materia continuamente.

Democrito: Va bene, va bene. Ma questo è un concetto importante. Parmenide adottò un'idea molto cara a noi Greci: l'unità. Il tutto. Ciò che esiste, esiste. È in sé completo ed eterno. Ho il sospetto che anche lei e i suoi colleghi crediate nell'unità.

Lederman: Sì, si tratta di un concetto duraturo e accattivante. Ci sforziamo, non appena possibile, di raggiungere l'unità nelle nostre credenze. La «grande unificazione» è una delle nostre ossessioni correnti.

Democrito: E, in effetti, voi non create semplicemente nuova materia con la sola volontà. Penso che dobbiate aggiungere energia al processo.

Lederman: È vero, e la bolletta della luce è lì a dimostrarlo.

Democrito: Dunque, in un certo senso, Parmenide non era poi così fuori strada. Se si includono materia ed energia in ciò che egli chiama Essere, allora ha ragione: esso non può né nascere né perire, almeno non completamente. E, tuttavia, i nostri sensi ci danno tutt'altre indicazioni. Vediamo alberi bruciati fino alle radici. Il fuoco può essere distrutto dall'acqua e questa può essere a sua volta fatta evaporare dall'aria calda dell'estate. I fiori sbocciano e poi appassiscono. Fu Empedocle a intravedere un modo di uscire da questa apparente contraddizione. Egli concordava con Parmenide sul fatto che la materia deve conservarsi, che non può apparire e sparire a piacere. Ma non concordava con Talete e Anassimene sul fatto che un tipo di materia potesse trasformarsi in un altro. In che modo, allora, si può spiegare il continuo cambiamento che vediamo intorno a noi? Empedocle sostenne che ci sono solo quattro tipi di materia, i suoi famosi terra, aria, acqua e fuoco. Essi non si trasformano qualitativamente, ma sono *particelle* ultime e immutabili che costituiscono gli oggetti concreti del mondo.

Lederman: Questo è parlare.

Democrito: Immaginavo che le sarebbe piaciuto. Gli oggetti nascono dalla mescolanza di questi elementi e periscono per la loro separazione. Gli elementi in se stessi, tuttavia, non nascono né periscono, ma sono immutabili. Ovviamente, non mi trovo d'accordo con lui circa l'identità di queste particelle, ma, in linea di massima, egli fece un importante balzo intellettuale. Ci sono solo pochi ingredienti fondamentali nel mondo, e gli oggetti sono formati dalla loro diversa mescolanza. Per esempio, Empedocle sosteneva che le ossa fossero composte per due parti di terra, per due parti d'acqua e per quattro parti di fuoco. Mi sfugge, al momento, come sia arrivato a questa ricetta.

Lederman: Abbiamo provato la miscela terra-aria-acqua-fuoco e tutto quel che abbiamo ottenuto è stata una ribollente fanghiglia calda.

Democrito: Vedete un po' che cosa succede a lasciar fare le cose a un «moderno».

Lederman: E le forze? Nessuno di voi Greci sembra rendersi conto che le forze sono altrettanto necessarie delle particelle.

Democrito: Ho i miei dubbi, ma Empedocle sarebbe stato d'accordo. Egli vide che erano necessarie delle forze per fondere questi elementi in altri oggetti. E ne propose due, amore e odio: l'amore per unire le cose, l'odio per separarle. Non molto scientifico, forse. Ma gli scienziati della vostra epoca non hanno forse un sistema analogo di credenze sull'universo? Un certo numero di particelle e un insieme di forze? Spesso con nomi fantasiosi?

Lederman: In un certo senso è vero. Abbiamo quel che chiamiamo il «modello standard», secondo cui tutto ciò che conosciamo dell'universo può essere spiegato mediante le interazioni di una dozzina di particelle e quattro forze.

Democrito: La concezione del mondo di Empedocle appare poi tanto diversa? Egli sostenne che l'universo si poteva spiegare con quattro particelle e due forze. Voi non avete fatto altro che aggiungerne due, ma la struttura dei due modelli è simile, no?

Lederman: Senz'altro, ma non concordiamo sul contenuto: fuoco, terra, odio...

Democrito: Be', suppongo che duemila anni di duro lavoro abbiano prodotto qualcosa. Ma no, nemmeno io sono d'accordo con il contenuto della teoria di Empedocle.

Lederman: Qual è dunque la sua idea?

Democrito: Ah, ora veniamo al sodo. L'opera di Empedocle e di Parmenide gettò le fondamenta della mia. La mia idea è l'a-tomo, o atomo, «ciò che non può essere diviso». L'atomo è il mattone dell'universo. Tutta la materia è composta di diversi agglomerati di atomi. È la cosa più piccola nell'universo.

Lederman: Avevate gli strumenti necessari per trovare oggetti invisibili nella Grecia del V secolo a.C.?

Democrito: «Trovare» non è il termine esatto.

Lederman: Che altro allora?

Democrito: Il termine migliore è forse «scoprire». Io scoprii l'atomo mediante la «ragion pura».

Lederman: Ciò che sta dicendo è che se lo è soltanto immaginato. Non si è preso la briga di fare esperimenti.

Democrito (indicando con un gesto il laboratorio): Ci sono esperimenti che la mente può fare meglio dei più grandi e più precisi strumenti.

Lederman: Che cosa le suggerì l'idea degli atomi? Devo ammettere che si trattava di un'ipotesi brillante. Ma supera di gran lunga tutto ciò che era stato detto prima.

Democrito: La pagnotta.

Lederman: La pagnotta? Qualcuno forse l'ha pagata per avere questa idea?

Democrito: Non quel genere di pagnotta. Questo accadeva prima dell'epoca dei finanziamenti pubblici. Intendo una vera e propria pagnotta. Un giorno, durante un prolungato digiuno, qualcuno attraversò il mio studio portando un pane appena sfornato. Seppi che si trattava di pane ancor prima di vederlo. Pensai: qualche essenza invisibile di pane si è diffusa arrivando fino al mio naso greco. Presi nota degli odori e riflettei su altre «essenze diffuse». Una pozza d'acqua si restringe e infine si prosciuga. Come? Perché? Possono delle essenze invisibili d'acqua emanare dalla pozzanghera e attraversare grandi distanze come è accaduto per il mio pane appena sfornato? Un mucchio di cose minuscole come quelle... che vengono alla vista, al pensiero, di cui si parla. Io e il mio amico Leucippo ragionammo per giorni e giorni, talvolta fino all'alba, finché le nostre mogli non ci inseguirono con dei bastoni. Finalmente, arrivammo a stabilire che, se ogni sostanza era composta di atomi, invisibili perché troppo piccoli per i nostri occhi umani, ne avremmo avuti di troppi tipi diversi: atomi d'acqua, atomi di ferro, atomi di petali di margherita, atomi di zampette d'ape, un sistema così sgraziato da essere non-greco.

Allora, ci venne un'idea migliore. Supponiamo di avere soltanto alcuni differenti generi di atomi – lisci, ruvidi, rotondi, spigolosi – e un numero selezionato di forme diverse, ma un'infinità per ciascun tipo. Mettiamoli quindi in uno spazio vuoto. (Ragazzi, avreste dovuto vedere tutta la birra che ci siamo scolati per arrivare a capire lo spazio vuoto! Come definire il «nulla totale»?) Facciamo in modo che questi atomi si muovano in maniera pressoché casuale. Facciamo sì che si muovano incessantemente, con occasionali collisioni che li portano talvolta ad aggregarsi e ad aderire gli uni agli altri. Un aggregato di atomi produce allora il vino, un altro il bicchiere in cui viene servito, e idem per la *feta*, le olive, i *baklavà*.*

Lederman: Aristotele non sostenne forse che questi atomi dovrebbero cadere per natura?

Democrito: Questo è un problema suo. Ha mai visto dei granelli di polvere che danzano in un raggio di luce che penetra in una stanza buia? La polvere si muove in tutte le direzioni, proprio come gli atomi.

Lederman: Come arrivò a concepire l'*indivisibilità* degli atomi?

Democrito: Mi venne semplicemente in mente. Immaginiamo un coltello di bronzo levigato. Chiediamo al nostro servo di impiegare l'intera giornata ad affilare la lama finché è in grado di tagliare un filo d'erba tenuto per una delle estremità. Finalmente soddisfatto, comincio ad agire. Prendo un pezzo di formaggio...

Lederman: *Feta*?

Democrito: Ovviamente. Poi taglio il formaggio in due parti con il coltello. E poi lo taglio ancora e ancora, finché ottengo un granello di formaggio troppo piccolo per poter essere tenuto in mano. Ora penso che se io stesso fossi molto più piccolo, il granello mi apparirebbe grande e potrei tenerlo in mano e tagliarlo ancora e poi

* Si tratta di specialità gastronomiche greche: la *feta* è il più rinomato formaggio nazionale, ricavato dal latte di pecora. I *baklavà* sono sfogliatine ripiene di mandorle tritate e cannella, e ricoperte di uno sciroppo denso di zucchero, vaniglia e limone. (*NdT*)

ancora con il mio affilatissimo coltello. Ora devo ancora ridurre me stesso, nella mia mente, alle dimensioni di un foruncolo sul naso di una formica. Continuo a tagliare il formaggio. Se ripeto a sufficienza questo processo, sa quale sarà il risultato?

Lederman: Sicuro, una marmellata di *feta*.

Democrito (*gemendo*): Anche il «filosofo che ride» può strangolarsi con una battuta del genere. Se posso continuare... Alla fine arriverò a un frammento di sostanza così duro che non si può più tagliare, anche se disponiamo di un numero di servi sufficiente ad affilare il coltello per centinaia d'anni. Penso che l'oggetto più piccolo non si possa tagliare per necessità. È inconcepibile che possiamo continuare a tagliare per sempre, come sostengono alcuni cosiddetti sapienti. Così ho ottenuto l'oggetto ultimo, che non può essere ulteriormente tagliato, l'*atomos*.

Lederman: E ha concepito questa idea nella Grecia del V secolo a.C.?

Democrito: Sì, perché? Le vostre idee attuali sono molto diverse?

Lederman: Be', in effetti, sono quasi le stesse. Ci dispiace solo che lei le abbia pubblicate prima.

Democrito: Comunque, ciò che voi scienziati chiamate atomo non è quello che avevo in mente io.

Lederman: Oh, questo è colpa di alcuni chimici del XIX secolo. No, nessuno al giorno d'oggi crede più che gli atomi della tavola periodica degli elementi – idrogeno, ossigeno, carbonio, eccetera – siano oggetti indivisibili. Quella fu una falsa partenza. Essi pensavano di aver trovato i *suoi* atomi. Ma si trovavano ancora a molti tagli di distanza dal formaggio ultimo.

Democrito: E oggi l'avete trovato?

Lederman: *Trovati*. Ce n'è più d'uno.

Democrito: Be', è ovvio. Anche io e Leucippo pensavamo che ce ne fossero molti.

Lederman: Credevo che Leucippo non fosse realmente esistito.

Democrito: Andate a dirlo alla signora Leucippo. Oh, lo so che alcuni studiosi pensano che si tratti di una figura mitica. Ma era reale come questo Macintosh (*picchia sul computer*), qualunque cosa esso sia. Leucippo era di Mileto, come Talete e gli altri. Elaborammo insieme la nostra teoria atomica, tant'è che è difficile ricordare chi trovò che cosa. Solo perché era di alcuni anni più vecchio, la gente dice che fu il mio maestro.

Lederman: Ma fu *lei* a insistere nel sostenere che esistevano molti atomi.

Democrito: Sì, me lo ricordo. Esiste un numero infinito di unità indivisibili. Esse differiscono per forma e grandezza, ma, al di là di questo, non hanno nessuna qualità reale oltre la solidità, l'impenetrabilità.

Lederman: Hanno una forma, ma per il resto sono prive di struttura.

Democrito: Sì, questo è un buon modo di esprimersi.

Lederman: Dunque, il vostro modello standard, per così dire, come metteva in relazione le qualità degli atomi con la sostanza che essi formavano?

Democrito: Be', non era proprio così specifico. Supponevamo che le cose dolci, per esempio, fossero fatte di atomi lisci e le cose amare di atomi taglienti. Lo sappiamo perché fanno male alla lingua. I liquidi sono fatti di atomi rotondi, mentre gli atomi di metallo hanno dei piccoli uncini che li tengono insieme. Ecco perché i metalli sono così duri. Il fuoco, come l'anima dell'uomo, è composto di piccoli atomi sferici. Come avevano teorizzato Parmenide ed Empedocle, niente di reale può nascere o perire. Gli oggetti che vediamo intorno a noi cambiano continuamente, ma ciò accade perché sono fatti di atomi, che possono aggregarsi e disaggregarsi.

Lederman: Come avviene questo processo di aggregazione e disaggregazione?

Democrito: Gli atomi sono in costante movimento. Talvolta, quando accade che abbiano forme in grado di combinarsi, si aggregano. E ciò crea oggetti abbastanza grandi da essere visibili: alberi, acqua, *dolmàdes*.* Questo costante movimento può anche portare alla disaggregazione degli atomi e all'apparente cambiamento della materia che vediamo intorno a noi.

Lederman: Ma, in termini di atomi, non viene mai creata nuova materia, né viene distrutta?

Democrito: No. Si tratta di un'illusione.

Lederman: Se ogni sostanza è costituita da questi atomi essenzialmente privi di proprietà caratteristiche, perché gli oggetti sono così diversi? Perché, per esempio, le pietre sono dure e le pecore morbide?

Democrito: Semplice. Le cose dure contengono meno spazio vuoto. Gli atomi sono più compressi. Le cose morbide contengono più spazio.

Lederman: Così voi Greci accettavate il concetto di spazio. Il vuoto.

Democrito: Certamente. Io e il mio socio Leucippo inventammo l'atomo. Dopodiché avevamo bisogno di qualcosa in cui metterlo.

* Un'altra specialità della cucina greca: involtini di foglie di vite ripieni di riso, cipolline e menta. (*NdT*)

Leucippo si trovò in un mare di pasticci (e un po' sbronzo) cercando di definire lo spazio vuoto in cui potevamo mettere i nostri atomi. Se è vuoto, è nulla, e come si può definire il nulla? Parmenide aveva dato una ferrea dimostrazione del fatto che lo spazio vuoto non può esistere. Finimmo per decidere che la sua dimostrazione non esisteva. (*Risatina.*) Che accidenti di problema! Ci volle un sacco di *retsìna*.* All'epoca di terra-aria-acqua-fuoco, il vuoto era considerato la quinta essenza, «quintessenziale», secondo il vostro modo di esprimervi. Ciò ci creava un grosso problema. Voi moderni accettate impavidamente il nulla?

Lederman: Bisogna. Nulla funziona senza, be', nulla. Ma si tratta, anche al giorno d'oggi, di un concetto difficile e complesso. Comunque, come lei ci ha ricordato, il nostro «nulla», il vuoto, è costantemente riempito di concetti teorici: etere, radiazioni, un mare di energia negativa, il campo di Higgs. Come lo spazio di una soffitta. Non so come potremmo farne a meno.

Democrito: Può ben immaginarsi quanto fosse difficile spiegare il vuoto nel 420 a.C. Parmenide aveva negato la realtà dello spazio vuoto. Leucippo fu il primo a sostenere che non poteva esserci movimento senza il vuoto, e dunque il vuoto doveva esistere. Ma Empedocle avanzò un'ingegnosa confutazione che ingannò la gente per un istante. Egli affermò che il movimento poteva aver luogo senza spazio vuoto. Si pensi a un pesce che nuota nell'oceano, disse. L'acqua si fende davanti alla sua testa, quindi riempie istantaneamente lo spazio lasciato dal pesce in movimento in corrispondenza della coda. I due, pesce e acqua, sono sempre in contatto. Scordatevi lo spazio vuoto.

Lederman: E la gente si bevve questo argomento?

Democrito: Empedocle era un uomo brillante, e prima aveva effettivamente demolito gli argomenti in favore del vuoto. Per esempio, i pitagorici, suoi contemporanei, accettavano il vuoto per l'ovvia ragione che le unità devono essere separate.

Lederman: Non erano quei filosofi che si rifiutavano di mangiare le fave?

Democrito: Sì, il che non è una cattiva idea in qualsiasi epoca. Essi avevano delle altre futili credenze, come quella che si dovesse evitare di sedere su uno staio o calpestare i ritagli delle unghie dei piedi. Ma, come lei ben sa, fecero anche delle cose interessanti nel campo della matematica e della geometria. Su questa faccenda

* Vino greco «resinato», cioè invecchiato in botti di legno con l'aggiunta di resina di pino. (*NdT*)

del vuoto, comunque, Empedocle li colse in fallo in quanto asserivano che il vuoto è riempito d'aria. Empedocle distrusse questo argomento semplicemente mostrando che l'aria era corporea.

Lederman: Come arrivò, allora, lei ad accettare il vuoto? Aveva rispetto per il pensiero di Empedocle, non è vero?

Democrito: In effetti, questo punto rappresentò un ostacolo insuperabile per molto tempo. Mi trovo in difficoltà con il vuoto. Come descriverlo? Se è realmente il nulla, allora come può esistere? Le mie mani toccano questa scrivania. Compiendo il gesto che lo avvicina al piano della scrivania, il mio palmo sente il lieve tocco dell'aria che riempie il vuoto fra me e la superficie della scrivania. Tuttavia, come aveva così abilmente argomentato Empedocle, l'aria non può essere il vuoto stesso. Come posso immaginare i miei atomi se non posso avvertire il vuoto in cui devono muoversi? E, nondimeno, se voglio fornire una spiegazione del mondo in termini di atomi, devo prima definire qualcosa che sembra indefinibile perché è privo di proprietà.

Lederman: Che cos'ha dunque fatto?

Democrito (*ridendo*): Ho deciso di non preoccuparmi. Ho fatto cadere il problema nel... vuoto.

Lederman: Ah, ah!

Democrito: Σκυσι (Scusi). Parlando seriamente, risolsi il problema con il mio coltello.

Lederman: Il suo coltello immaginario che taglia il formaggio in atomi?

Democrito: No, un coltello reale che taglia, diciamo, una mela reale. La lama deve trovare degli spazi vuoti in cui penetrare.

Lederman: E se la mela fosse composta di atomi solidi compressi in un ammasso, senza spazio?

Democrito: Allora sarebbe impenetrabile, dal momento che gli atomi sono impenetrabili. No, tutta la materia che possiamo vedere e toccare può essere tagliata, se avete una lama abbastanza affilata. Perciò il vuoto esiste. Ma, soprattutto, dissi a me stesso allora, e me lo dico tuttora, che non ci si deve lasciare mettere in scacco per sempre dalle difficoltà logiche. Andiamo avanti, procediamo come se il nulla fosse accettabile. Sarà un importante esercizio, se dobbiamo continuare a cercare una chiave di accesso al funzionamento del tutto. Dobbiamo essere pronti a rischiare delle cadute quando scegliamo di camminare sul filo del rasoio della logica. Suppongo che i vostri moderni scienziati sperimentali sarebbero urtati da questo atteggiamento. Voi avete bisogno di provare tutto prima di andare avanti.

Lederman: No, il suo approccio è molto moderno. Noi facciamo lo stesso. Procediamo in base a delle ipotesi, altrimenti non arriveremmo mai da nessuna parte. A volte diamo addirittura ascolto a quel che dicono gli scienziati teorici. E si sa che aggiriamo i problemi lasciandoli da risolvere ai fisici futuri.
Democrito: Sta cominciando a dire qualcosa di sensato.
Lederman: Così, per riassumere, il suo universo è semplicissimo.
Democrito: Niente esiste tranne gli atomi e il vuoto; tutto il resto è opinione.
Lederman: Se ha già pensato tutto questo, perché si trova qui, in questo scorcio di secolo?
Democrito: Come ho detto, ho fatto un salto nel tempo per vedere quando e se le opinioni degli uomini coincideranno finalmente con la realtà. So che i miei compatrioti hanno rifiutato l'a-tomo, la particella ultima. Vedo che nel 1993 non solo lo si accetta, ma si crede addirittura di averlo trovato.
Lederman: Sì e no. Noi crediamo che vi sia una particella ultima, ma non esattamente nel senso che ha detto lei.
Democrito: Mi spieghi un po'.
Lederman: In primo luogo, pur credendo che l'atomo sia il mattone fondamentale, lei, di fatto, crede che ci siano molti tipi di atomi: i liquidi sono composti di a-tomi rotondi; gli a-tomi dei metalli sono uncinati; a-tomi lisci formano lo zucchero e altre sostanze dolci; a-tomi taglienti formano i limoni e altre sostanze aspre, e così via.
Democrito: E voi, invece?
Lederman: Troppo complicato. Il nostro a-tomo è molto più semplice. Nel vostro modello ci sarebbe un'eccessiva varietà di a-tomi. Potreste addirittura averne uno per ogni tipo di sostanza. Noi speriamo di trovare un solo «a-tomo».
Democrito: Ammiro questa ricerca della semplicità, ma come funzionerebbe un simile modello? Come ottenere la varietà da un solo a-tomo, e che cos'è esattamente questo a-tomo?
Lederman: A questo stadio abbiamo un piccolo numero di a-tomi. Un tipo di a-tomo lo chiamiamo *quark*, un altro *leptone* e riconosciamo sei forme per tipo.
Democrito: In che cosa assomigliano al mio a-tomo?
Lederman: Sono indivisibili, solidi, privi di struttura. Sono invisibili. Sono... piccoli.
Democrito: Quanto piccoli?
Lederman: Pensiamo che il quark sia come un punto. Non ha dimensioni e di conseguenza, a differenza del suo a-tomo, non ha nessuna forma.

Democrito: Niente dimensioni? E tuttavia esiste, è solido?
Lederman: Pensiamo che sia un punto matematico, e dunque la questione della sua solidità è controversa. L'apparente solidità della materia dipende dai dettagli del modo in cui i quark si combinano l'uno con l'altro e con i leptoni.
Democrito: Questo è difficile da capire. Ma mi dia tempo. Comprendo il vostro problema teorico. Credo di poter accettare questo quark, questa sostanza priva di dimensioni. Tuttavia, come si può spiegare la varietà del mondo che ci circonda – alberi, oche e Macintosh – con così poche particelle?
Lederman: I quark e i leptoni si combinano per formare quant'altro esiste nell'universo. E ne contiamo sei per ciascun genere. Possiamo fare miliardi di cose diverse con solo due quark e un leptone. Per un momento abbiamo pensato che non fosse necessario nient'altro. Ma la natura esige di più.
Democrito: Sono d'accordo sul fatto che considerare dodici particelle sia di gran lunga più semplice che ricorrere ai miei numerosi a-tomi, ma dodici è pur sempre un bel numero.
Lederman: I sei tipi di quark sono forse differenti manifestazioni della stessa cosa. Noi diciamo che ci sono sei *sapori* di quark. Ciò ci consente di combinare i vari quark per formare tutti i tipi di materia. Ma non è necessario avere un sapore distinto di quark per ogni tipo di oggetto nell'universo – uno per il fuoco, uno per l'ossigeno, uno per il piombo – come richiede il vostro modello.
Democrito: Come si combinano questi quark?
Lederman: C'è una *forza* o *interazione forte* tra i quark, un curiosissimo tipo di forza che si comporta in maniera molto diversa dalle forze elettriche, che pure sono in gioco.
Democrito: Sì, sono a conoscenza di questa faccenda dell'elettricità. Ho avuto una breve conversazione con quel tizio, Faraday, nel XIX secolo.
Lederman: Un brillante scienziato.
Democrito: Forse, ma un pessimo matematico. Non se la sarebbe mai cavata in Egitto, dove ho studiato. Ma sto deviando dall'argomento. Ha parlato di una forza forte. Sta forse alludendo a quella forza gravitazionale di cui ho sentito parlare?
Lederman: La gravità? Troppo debole. In realtà, i quark sono tenuti insieme da particelle che si chiamano *gluoni*.
Democrito: Ah, i vostri gluoni. Ora sta parlando di un tipo completamente nuovo di particella. Credevo che la materia fosse composta dai quark.

Lederman: Certo. Ma non dimentichi le forze. Ci sono anche particelle che chiamiamo *bosoni «gauge»*. Questi bosoni svolgono una missione. Il loro compito è di portare informazioni sulla forza dalla particella A alla particella B e poi indietro ancora ad A. Altrimenti, come farebbe B a sapere che A sta esercitando una forza?

Democrito: Wow! Eureka! Che idea greca! Sarebbe piaciuta a Talete.

Lederman: I bosoni «gauge» o portatori di forza o, come diciamo, «mediatori della forza», hanno proprietà – massa, spin, carica – che determinano di fatto il comportamento della forza. Così, per esempio, i *fotoni*, che sono portatori della forza elettromagnetica, hanno massa zero, il che consente loro di viaggiare a una velocità molto elevata. Ciò sta a indicare che la forza ha una portata molto ampia. Anche quella che chiamiamo interazione forte, di cui sono responsabili i gluoni dotati di massa zero, ha una portata infinita, ma è così *forte* che i quark non possono mai allontanarsi di molto l'uno dall'altro. Le particelle pesanti W e Z, che trasportano quella che chiamiamo *interazione debole*, hanno un raggio d'azione molto breve. Esse operano solo a distanze infinitesimali. Abbiamo una particella per la gravità, che abbiamo chiamato *gravitone*, anche se stiamo ancora aspettando di vederne una e addirittura di formulare una buona teoria.

Democrito: E questo lo chiamate «più semplice» del mio modello?

Lederman: Come spiegavate voi atomisti le varie forze?

Democrito: Non le spiegavamo. Io e Leucippo sapevamo che gli atomi devono essere in costante movimento, e accettavamo semplicemente l'idea. Non davamo alcuna ragione del perché il mondo dovesse essere originariamente dotato di questo incessante movimento atomico, tranne forse nel senso milesio che la causa del movimento è parte degli attributi dell'atomo. Il mondo è quel che è, e se ne devono accettare certe caratteristiche fondamentali. Con tutte le vostre teorie sulle quattro forze diverse, potete forse non essere d'accordo con questa idea?

Lederman: No davvero. Ma forse ciò significa che gli atomisti credevano fermamente nel fato, o nel caso?

Democrito: Tutto ciò che esiste nell'universo è il frutto del caso e della necessità.

Lederman: Caso e necessità: due concetti opposti.

Democrito: Nondimeno, la natura obbedisce a entrambi. È vero che da un seme di papavero nasce sempre un papavero, mai un cardo. Questo è opera della necessità. Ma il numero di semi di papavero formati dalla collisione degli atomi può ben avere forti elementi casuali.

Lederman: Ciò che sta dicendo è che la natura ci distribuisce una particolare mano di poker, che è casuale; ma quella mano ha conseguenze necessarie.

Democrito: Una similitudine volgare, ma sì, questo è il modo in cui opera. Vi risulta così estraneo?

Lederman: No, quanto ha appena descritto assomiglia a una delle dottrine fondamentali della fisica moderna. Noi la chiamiamo «teoria dei quanti».

Democrito: Ah, sì, quei giovani scavezzacolli degli anni Venti e Trenta. Non mi sono trattenuto a lungo in quell'epoca. Tutte quelle zuffe con quell'Einstein... Non hanno mai avuto molto senso per me.

Lederman: Non le piacciono quelle stupende polemiche fra la cabala quantistica – Niels Bohr, Werner Heisenberg, Max Born e il loro gruppo – e fisici come Erwin Schrödinger e Albert Einstein, che si battevano contro l'idea che le vie della natura siano determinate dal caso?

Democrito: Non mi fraintenda. Uomini brillanti, tutti quanti. Ma le loro argomentazioni finivano sempre con un partito o con l'altro che tirava fuori Dio e le Sue ipotetiche motivazioni.

Lederman: Einstein diceva di non potersi rassegnare all'idea che Dio giochi a dadi con l'universo.

Democrito: Sì, tirano sempre fuori dalla manica la carta di Dio quando la discussione arriva a un punto morto. Mi creda, ne ho avuto abbastanza nell'antica Grecia. Anche il mio difensore Aristotele mi ha gettato la croce addosso per le mie idee sul caso e per aver accettato il movimento come un dato.

Lederman: Fino a che punto le piaceva la teoria dei quanti?

Democrito: Penso che mi piacesse proprio. Poi incontrai Richard Feynman, che mi confidò che nemmeno lui aveva mai capito la teoria dei quanti. Ho sempre avuto problemi con... Un momento! Lei ha cambiato argomento. Torniamo a quelle particelle «semplici» di cui stava blaterando. Stava spiegando come i quark si incollino insieme per formare... formare che cosa?

Lederman: I quark sono i mattoni di un'ampia classe di oggetti che chiamiamo *adroni*. Il termine deriva da una parola greca che vuol dire «pesante».

Democrito: Ma davvero!

Lederman: È il minimo che possiamo fare. Il più famoso «oggetto» composto di quark è il *protone*. Ci vogliono tre quark per fare un

protone. In effetti, ci vogliono tre quark per fare i molti cugini del protone, ma con sei differenti quark ci sono una gran quantità di combinazioni di tre quark, mi pare duecentosedici. La maggior parte di questi adroni è stata scoperta e ha ricevuto nomi di lettere greche come lambda (Λ), sigma (Σ), eccetera.

Democrito: Il protone è uno di questi adroni?

Lederman: Non solo, ma è anche il più famoso nel nostro universo attuale. Per esempio, si possono unire tre quark per ottenere un protone o un *neutrone*. Poi si può ottenere un atomo aggiungendo a un protone un *elettrone*, che appartiene alla famiglia delle particelle chiamate leptoni. Questo particolare atomo si chiama idrogeno. Con otto protoni e un ugual numero di neutroni e otto elettroni si può costruire un atomo di ossigeno. I neutroni e i protoni si concentrano in un piccolissimo ammasso che chiamiamo nucleo. Uniamo due atomi di idrogeno e uno di ossigeno e otterremo l'acqua. Un po' d'acqua, di carbonio, di ossigeno e d'azoto, e presto o tardi si otterranno moscerini, cavalli e Greci.

Democrito: E tutto questo dai quark.

Lederman: Sicuro.

Democrito: Ed è tutto ciò che serve.

Lederman: Non del tutto. È necessario qualcosa che consenta agli atomi di stare insieme e poi di aggregarsi con altri atomi.

Democrito: Ancora i gluoni.

Lederman: No, essi si limitano a tenere insieme i quark.

Democrito: Μαμμα μια! (Mamma mia!)

Lederman: Questo è ciò a cui ci hanno portato Faraday e gli altri «elettricisti», come Chuck Coulomb. Essi hanno studiato le forze elettriche che trattengono gli elettroni attorno al nucleo. Gli atomi si attraggono reciprocamente mediante una complicata danza di nuclei ed elettroni.

Democrito: Questi elettroni hanno anche a che fare con l'elettricità?

Lederman: È uno dei loro principali contenitori.

Democrito: Così, sono anch'essi bosoni «gauge», come i fotoni e le particelle W e Z?

Lederman: No, gli elettroni sono particelle di materia. Appartengono alla famiglia dei leptoni. Quark e leptoni costituiscono la materia. Fotoni, gluoni, particelle W e Z e gravitoni costituiscono le forze. Uno dei più interessanti sviluppi d'oggi è che si sta annullando la stessa distinzione tra forza e materia. Tutto è costituito da particelle. Una nuova semplicità.

Democrito: Preferisco il mio sistema. La mia complessità sembra più semplice della vostra semplicità. Quali sono, dunque, gli altri cinque leptoni?

Lederman: Ci sono tre varietà di *neutrini*, più due leptoni chiamati *muone* e *tau*. Ma non approfondiamo, per il momento. L'elettrone è di gran lunga il leptone più importante nell'economia globale di oggi.

Democrito: Così, dovrei preoccuparmi soltanto dell'elettrone e dei sei quark. Questi spiegano gli uccelli, il mare, le nuvole...

Lederman: In verità, quasi tutto nell'universo attuale è composto soltanto da due quark – il *quark «su»* e il *quark «giù»* – e dall'elettrone. Il neutrino sfreccia liberamente intorno all'universo e balza fuori dai nostri nuclei radioattivi, ma la maggior parte degli altri quark e leptoni deve essere prodotta nei nostri laboratori.

Democrito: Perché ne abbiamo bisogno allora?

Lederman: È una buona domanda. Noi crediamo questo: ci sono dodici particelle fondamentali di materia. Sei quark e sei leptoni. Solo alcune di esse esistono oggi in abbondanza. Ma si trovavano tutte qui, in condizioni di parità, durante il Big Bang, la nascita dell'universo.

Democrito: E chi è che crede a tutto ciò, i sei quark e i sei leptoni? Una manciata di colleghi? Pochi rinnegati? Tutti voi?

Lederman: Tutti. Tutti i fisici delle particelle intelligenti, almeno. Ma questo concetto è accettato da pressoché tutti gli scienziati. Si fidano di noi su questo punto.

Democrito: Dov'è, dunque, che non siamo d'accordo? Io ho affermato che esisteva un atomo indivisibile. Ma ce n'erano molti. E si combinavano perché avevano forme e caratteristiche complementari. Voi dite che ci sono solo sei o dodici di questi «a-tomi». E che essi non hanno forma, ma si combinano perché sono dotati di cariche elettriche complementari. I vostri quark e leptoni sono anch'essi indivisibili. Ebbene, siete sicuri che ce ne siano solo dodici?

Lederman: Be', dipende da come si conta. Ci sono anche sei *antiquark* e sei *antileptoni* e...

Democrito: Περ λε μυτανδε δελ γρανδε Ζευσ! (Per le mutande del grande Zeus!)

Lederman: Non va così male come sembra. C'è molto più accordo che disaccordo. Ma, nonostante quello che mi ha detto, sono ancora sbalordito che un simile primitivo, ignorante pagano possa aver avuto l'idea dell'atomo, che noi chiamiamo quark. Che genere di esperimenti ha fatto per verificare questa idea? Noi qui spendiamo miliardi di dracme per controllare ogni concetto. Come ha fatto a cavarsela così a buon mercato?

Democrito: Abbiamo proceduto nella vecchia maniera. Non avendo un Dipartimento per l'energia o un Centro nazionale per la ricerca scientifica, abbiamo dovuto usare la «ragion pura».

Lederman: Così, vi siete inventati dal niente le vostre teorie.

Democrito: No, anche noi Greci antichi avevamo degli indizi dai quali traevamo le nostre idee. Come ho già detto, vedevamo che dai semi di papavero nascono sempre dei papaveri. La primavera segue sempre l'inverno. Il sole sorge e tramonta. Empedocle studiò le clessidre e la manifattura dei vasi. Si possono inferire conclusioni tenendo gli occhi aperti.

Lederman: «Si possono osservare parecchie cose semplicemente guardando», come ha detto una volta uno dei miei contemporanei.

Democrito: Esattamente! Chi è questo saggio, così greco nella sua prospettiva?

Lederman: Yogi Berra.

Democrito: Uno dei vostri più grandi filosofi, senza dubbio.

Lederman: Può ben dirlo. Ma perché questa sfiducia nell'esperimento?

Democrito: La mente è meglio dei sensi. Essa contiene conoscenza *autentica*. Il secondo genere di conoscenza è conoscenza fasulla, che proviene appunto dai sensi: vista, udito, odorato, gusto, tatto. Ci pensi un po'. La bevanda che ha un gusto dolce per lei può avere un gusto amaro per me. Una donna che a lei appare bella, per me è un orrore. Un bambino brutto sembra bello alla madre. Come possiamo fidarci di simili informazioni?

Lederman: Lei non crede, dunque, che possiamo misurare il mondo oggettivo? I nostri sensi elaborano semplicemente informazioni sensoriali?

Democrito: No, i nostri sensi non creano conoscenza dal nulla. Gli oggetti effondono i loro atomi. Ecco come avviene che noi possiamo vederli o odorarli, come quel pane di cui le ho parlato. Questi atomi-immagini penetrano attraverso i nostri organi di senso, che sono vie d'accesso all'anima. Ma le immagini vengono distorte nel loro cammino attraverso l'aria, e questo è il motivo per cui è possibile non vedere affatto gli oggetti molto lontani. I sensi non forniscono informazioni affidabili sulla realtà. Tutto è soggettivo.

Lederman: Per lei non esiste nessuna realtà oggettiva?

Democrito: Oh, c'è una realtà oggettiva. Ma noi non siamo in grado di percepirla fedelmente. Quando si è malati, il cibo ha un gusto diverso. L'acqua può sembrare calda a una mano e non all'altra. Dipende tutto dalla disposizione temporanea degli atomi nei nostri corpi e dalla loro reazione alla combinazione, ugualmente temporanea, nell'oggetto che viene percepito dai sensi. La verità deve essere più profonda dei sensi.

Lederman: L'oggetto da misurare e lo strumento di misura – in questo caso il corpo – interagiscono e modificano la natura dell'oggetto, rendendo così vaga la misurazione.

Democrito: Uno strano modo di pensarla, ma sì. A che cosa mira?

Lederman: Be', invece di concepirla come conoscenza fasulla, la si può vedere come una questione di *indeterminazione* della misurazione, o della sensazione.

Democrito: Potrebbe andarmi bene. O, per citare Eraclito, «I sensi rendono una cattiva testimonianza».

Lederman: È forse tanto meglio la mente, anche se lei la considera fonte di conoscenza «autentica»? La mente, nella vostra concezione del mondo, è una proprietà di ciò che chiamate anima, che, a sua volta, è composta anch'essa di atomi. Non sono forse anche questi atomi in costante movimento, e non interagiscono con atomi distorti dall'ambiente esterno? È possibile un'assoluta separazione fra sensi e pensiero?

Democrito: Lei coglie un punto importante. Come ho detto in passato, «Povera mente, proviene da noi». Dai sensi. Tuttavia, la «ragion pura» è meno fuorviante dei sensi. Per quanto mi riguarda, rimango scettico sui vostri esperimenti. Trovo quasi ridicole queste enormi costruzioni, con tutti i loro fili e macchinari.

Lederman: Forse lo sono. Ma si innalzano come monumenti alla difficoltà di fidarsi di ciò che vediamo, udiamo e tocchiamo. Le sue osservazioni sulla soggettività della misurazione le abbiamo apprese lentamente, fra i secoli XVI e XVIII. Abbiamo, a poco a poco, imparato a ridurre l'osservazione e la misurazione ad atti oggettivi, come scrivere dei numeri su un taccuino. Abbiamo imparato a esaminare un'ipotesi, un'idea, un processo naturale da molte angolazioni, in molti laboratori e a opera di molti scienziati, finché è emersa, per consenso, la miglior approssimazione alla realtà oggettiva. Abbiamo costruito meravigliosi strumenti per aiutarci a osservare, ma abbiamo imparato a essere scettici su quello che essi ci rivelavano, finché non veniva ripetuto in molti posti diversi e con molte tecniche diverse. Infine, abbiamo sottoposto le conclusioni al controllo del tempo. Se, cento anni dopo, un giovane scienziato che cercava di farsi un nome dava loro uno scossone, era il benvenuto. Lo ricompensavamo con lodi e onori. Abbiamo imparato a sopprimere la nostra invidia e la nostra paura e ad amare le sfide.

Democrito: E l'autorità? La maggior parte di ciò che il mondo sa della mia opera l'ha appreso da Aristotele. Mi parli dell'autorità. La gente veniva esiliata, imprigionata e bruciata se non era d'accordo con il vecchio Aristotele. L'idea dell'atomo se la cavò a stento nel Rinascimento.

Lederman: Le cose vanno molto meglio adesso. Non perfettamente, ma meglio. Oggi potremmo quasi definire un buon scienziato dal suo scetticismo nei confronti dell'establishment.

Democrito: Per Zeus, questa è una buona notizia. Quanto pagate gli scienziati maturi che non fanno esperimenti?

Lederman: Ovviamente, lei sta facendo domanda per un posto di teorico. Non ne ho molti in servizio, anche se l'orario è buono. I teorici non programmano mai incontri di mercoledì perché ciò sacrifica due fine settimana. Inoltre, lei non è così contrario agli esperimenti come vuol far credere. Che le piaccia o no l'idea, lei ha fatto degli esperimenti.

Democrito: Davvero?

Lederman: Sicuro. Il suo coltello. Si trattava di un esperimento mentale, ma pur sempre di un esperimento. Tagliando sempre più quel pezzo di formaggio nella sua mente è giunto alla sua teoria dell'atomo.

Democrito: Sì, ma era tutto nella mia mente. «Ragion pura».

Lederman: Che direbbe se le mostrassi quel coltello?

Democrito: Di che sta parlando?

Lederman: Che direbbe se le mostrassi un coltello che può tagliare la materia per sempre, fino ad arrivare a tagliare un a-tomo.

Democrito: Ha trovato un coltello che può tagliare un atomo? In *questa* città?

Lederman (accennando di sì con il capo): Siamo seduti proprio adesso sulla nervatura principale.

Democrito: È questo laboratorio il suo coltello?

Lederman: L'acceleratore di particelle. Sotto i nostri piedi le particelle si muovono a spirale dentro un tubo di oltre sei chilometri di circonferenza cozzando l'una contro l'altra.

Democrito: È questo il modo in cui voi «tagliate» la materia per arrivare all'a-tomo?

Lederman: Ai quark e ai leptoni, sì.

Democrito: Sono veramente impressionato. E siete sicuri che non ci sia nulla di più piccolo?

Lederman: Ma sì; siamo assolutamente sicuri, penso, forse.

Democrito: Ma non del tutto. Altrimenti avreste smesso di «tagliare».

Lederman: «Tagliare» ci insegna qualcosa sulle proprietà dei quark e dei leptoni, anche se non ci sono omini che vanno a spasso al loro interno.

Democrito: C'è una cosa che mi sono dimenticato di chiedere. I quark... sono tutti simili a punti, privi di dimensioni; non hanno una reale grandezza. Come li distinguete, dunque, oltre che per le loro cariche elettriche?

Lederman: Hanno masse diverse.

Democrito: Alcuni sono pesanti, altri leggeri?

Lederman: Sì.

Democrito: La cosa mi lascia perplesso.

Lederman: Il fatto che abbiano masse diverse?

Democrito: Il fatto che abbiano un peso. I *miei* atomi non hanno peso. Non vi disturba il fatto che i vostri quark abbiano una massa? Può spiegarmelo?

Lederman: Sì, ci disturba parecchio, e no, non posso spiegarglielo. Ma questo è ciò che indicano i nostri esperimenti. Con i bosoni «gauge» va anche peggio. Le teorie ragionevoli dicono che dovrebbero avere massa zero, nulla, zero spaccato! Ma...

Democrito: Qualsiasi calderaio tracio ignorante si troverebbe nello stesso imbarazzo. Prendete una pietra. La sentite pesante. Prendete un fiocco di lana. Lo sentite leggero. È una conseguenza del fatto di vivere in questo mondo che gli atomi – o i quark, se preferite – hanno pesi diversi. Ma, ancora una volta, i sensi sono cattivi testimoni. Usando la «ragion pura», non vedo perché la materia dovrebbe avere una massa. Può spiegarmelo? Che cosa dà alle particelle la loro massa?

Lederman: È un mistero. Stiamo ancora lottando con questa idea. Se resta nelle vicinanze della stanza di controllo fino al capitolo VIII di questo libro, faremo completa chiarezza. Sospettiamo che la massa provenga da un campo.

Democrito: Un campo?

Lederman: I nostri fisici teorici lo chiamano «campo di Higgs». Esso pervade tutto lo spazio, l'*apeiron*, ingombrando il vostro vuoto, trascinando la materia, rendendola pesante.

Democrito: Higgs? Chi è Higgs? Perché la vostra gente non dà il mio nome a qualcosa... per esempio, il «democritone»! Solo a pronunciarlo *saprete* che interagisce con tutte le altre particelle.

Lederman: Spiacente. I teorici danno sempre alle cose il nome l'uno dell'altro.

Democrito: Che cos'è dunque questo campo?

Lederman: Il campo è rappresentato da una particella che chiamiamo *bosone di Higgs*.
Democrito: Una particella! Questa idea mi solletica già. E avete trovato questa particella di Higgs nei vostri acceleratori?
Lederman: A essere sinceri, no.
Democrito: E dove l'avete trovata?
Lederman: Non l'abbiamo ancora trovata. Esiste solo nella mente collettiva dei fisici. Qualcosa come una specie di «ragion impura».
Democrito: Perché credete alla sua esistenza?
Lederman: Perché deve esistere. I quark, i leptoni, le quattro forze conosciute... nessuna di queste cose ha veramente senso se non c'è un enorme campo che distorce ciò che vediamo, alterando i nostri risultati sperimentali. Per deduzione, deve esserci il campo di Higgs.
Democrito: Parla come un Greco. Mi piace questo campo di Higgs. Be', adesso devo proprio andare. Ho sentito dire che nel XXI secolo fanno una liquidazione di sandali. Prima di continuare nel futuro, ha qualche idea di quando e dove dovrei andare per vedere qualche progresso più significativo nella ricerca del mio atomo?
Lederman: Due tempi, due posti diversi. Per prima cosa, le suggerisco di tornare qui a Batavia nel 1995. Poi di provare a Waxahachie, nel Texas, intorno, diciamo, al 2005.
Democrito (sbuffando): Oh, andiamo! Voi fisici siete tutti uguali. Lei pensa che sarà tutto chiarito entro un paio d'anni. Ho fatto visita a Lord Kelvin nel 1900 e a Murray Gell-Mann nel 1972 e tutti e due mi hanno assicurato che la fisica era arrivata al capolinea; che tutto era stato perfettamente compreso. Mi dissero di ripassare nel giro di sei mesi che tutte le anomalie sarebbero state eliminate.
Lederman: Non sto dicendo questo.
Democrito: Spero di no. Ho battuto questa via per duemilaquattrocento anni. Non è così facile.
Lederman: Lo so. Le dico di ripassare nel 1995 e nel 2005 perché penso che vi troverà alcuni eventi *interessanti*.
Democrito: Per esempio?
Lederman: Ci sono i quark, ricorda? Ne abbiamo trovati solo cinque, l'ultimo qui al Fermilab nel 1977. Dobbiamo trovare il sesto, quello che chiude la serie, il più pesante. Lo chiamiamo *top quark*, quark «alto».
Democrito: Comincerete a cercarlo nel 1995?
Lederman: Lo stiamo cercando già da ora, come le dico. Le particelle che girano vorticosamente sotto i nostri piedi vengono frantumate e meticolosamente esaminate alla ricerca di questo quark. Non lo abbiamo ancora trovato. Ma entro il 1995 lo avremo trovato... o avremo dimostrato che non esiste.

Democrito: Siete in grado di farlo?
Lederman: Sì, la nostra macchina è abbastanza potente, abbastanza precisa. Se lo troviamo, allora è tutto a posto. Avremo ulteriormente consolidato l'idea che i sei quark e i sei leptoni siano i suoi a-tomi.
Democrito: E in caso contrario...
Lederman: Allora andrà tutto in pezzi. Le nostre teorie, il nostro modello standard, non varranno quasi più niente. I teorici si butteranno dalle finestre del secondo piano. Si segheranno i polsi con coltelli da burro.
Democrito (ridendo): Che spasso! Ha ragione. Devo proprio tornare a Batavia nel 1995.
Lederman: Potrei aggiungere che potrebbe anche significare la fine della sua teoria.
Democrito: Le mie idee sono sopravvissute a molte burrasche, giovanotto. Se l'a-tomo non è un quark o un leptone, salterà fuori che è qualcos'altro. Ma mi dica. Perché il 2005? E dove si trova questa Waxahachie?
Lederman: Nel Texas, dove stiamo costruendo, nel bel mezzo del deserto, il più grande acceleratore di particelle della storia. In effetti, si tratterà del più grande strumento scientifico di qualsiasi genere mai costruito dai tempi delle grandi piramidi. (Non so chi abbia progettato le piramidi, ma i miei antenati hanno fatto tutto il lavoro!) Il Super Collisore Superconduttore, la nostra nuova macchina, dovrebbe funzionare a pieno ritmo nel 2005, anno più anno meno, a seconda di quando il Congresso approverà i finanziamenti.
Democrito: Che cosa troverà il vostro nuovo acceleratore che quello che avete qui non può trovare?
Lederman: Il bosone di Higgs. Esso darà la caccia al campo di Higgs. Cercherà di catturare la particella di Higgs. Noi speriamo che scoprirà definitivamente perché le cose sono pesanti e perché il mondo appare così complicato quando lei e io sappiamo che, nel profondo, è così semplice.
Democrito: Come un tempio greco.
Lederman: O come una *shul** nel Bronx.

* Voce jiddish che significa «sinagoga». (*NdT*)

Democrito: Devo proprio vedere questa nuova macchina. E questa particella. Il bosone di Higgs... un nome non molto poetico.
Lederman: Io la chiamo «particella di Dio».
Democrito: Meglio, anche se preferisco la *d* minuscola. Ma mi dica: lei è uno sperimentatore. Che prove fisiche avete accumulato finora per questa particella di Higgs?
Lederman: Nessuna. Zero. In effetti, al di fuori della «ragion pura», l'evidenza convincerebbe i fisici più ragionevoli che essa non esiste.
Democrito: E tuttavia persistete.
Lederman: L'evidenza negativa è solo preliminare. Inoltre, abbiamo un modo di dire in questo paese...
Democrito: Sì?
Lederman: «Non è finita finché non è finita».
Democrito: Yogi Berra?
Lederman: *Yes*.
Democrito: Un vero genio.

Sulle coste settentrionali dell'Egeo, nella provincia greca della Tracia, alle foci del fiume Nesto, sorge la città di Abdera. Come in molte altre città di questa parte del mondo, la storia è scritta nelle pietre stesse delle alture che dominano i supermercati, i parcheggi e i cinema. Circa 2400 anni fa, la città era sulla via di traffico che collegava la madrepatria alle fiorenti colonie greche della Ionia, corrispondente alla regione occidentale dell'attuale Turchia. Abdera era stata infatti fondata da profughi della Ionia che fuggivano dagli eserciti di Ciro il Grande.

Immaginate di vivere ad Abdera nel V secolo a.C. In questa terra di capre, agli eventi naturali non si attribuivano necessariamente delle cause scientifiche. I lampi erano saette scagliate dalla cima del monte Olimpo da uno Zeus infuriato. Che il mare fosse calmo o tempestoso dipendeva dal temperamento mutevole di Poseidone. Abbondanza o carestia erano conseguenza del capriccio di Cerere, la dea dell'agricoltura, anziché delle condizioni atmosferiche. Immaginate, dunque, la concentrazione e l'integrità di una mente capace di ignorare le credenze popolari dell'epoca e di arrivare a concetti in armonia con i quark e la teoria dei quanti. Nella Grecia antica, come al giorno d'oggi, il progresso era il prodotto casuale del genio, del talento di individui dotati di colpo d'occhio e creatività. Ma, anche come genio, Democrito era molto in anticipo sui suoi tempi.

Egli è probabilmente più noto per due delle frasi più pregne di intuito scientifico che siano mai state pronunciate da un antico: «Niente esiste, eccetto gli atomi e il vuoto; tutto il resto è opinione» e «Tutto ciò che esiste nell'universo è il frutto del caso e della necessità». Naturalmente, non possiamo ignorare l'importanza dell'eredità di Democrito, le colossali conquiste intellettuali dei suoi predecessori di Mileto. Questi uomini definirono la missione: un solo ordine sta sotto al caos delle nostre percezioni e noi siamo in grado di comprenderlo.

Democrito fu probabilmente aiutato dal fatto di aver viaggiato. «Ho fatto più strada di qualsiasi altro uomo del mio tempo, compiendo le più approfondite ricerche, e ho visto più climi e paesi, e conosciuto più uomini famosi...» Egli imparò l'astronomia in Egitto e la matematica a Babilonia. Visitò la Persia. Ma l'ispirazione alle sue teorie atomistiche gli venne dalla Grecia, com'era stato per i suoi predecessori Talete, Empedocle e, ovviamente, Leucippo.

E scrisse! Il catalogo della biblioteca di Alessandria elencava più di sessanta opere di vario argomento: fisica, cosmologia, astronomia, geografia, fisiologia, medicina, teoria della sensazione, epistemologia, matematica, magnetismo, botanica, teoria della poesia e della musica, linguistica, agricoltura, pittura e altro. Nessuna delle opere da lui pubblicate ci è pervenuta per intero; conosciamo Democrito soprattutto dai frammenti e dalle testimonianze tramandatici da autori greci successivi. Come Newton, scrisse anche di magia e di alchimia. Che uomo era mai questo?

Gli storici lo chiamano «il filosofo che ride», mosso all'ilarità dalle follie degli uomini. Probabilmente era ricco; la maggior parte dei filosofi greci lo era. Sappiamo che disapprovava il sesso. Diceva che il sesso è così piacevole che annebbia la coscienza. Forse era questo il suo segreto, e forse dovremmo bandire il sesso fra i teorici in modo che possano pensare più chiaramente. (Gli sperimentatori non hanno bisogno di pensare e quindi dovrebbero essere esentati da questa norma.) Democrito apprezzava l'amicizia, ma pensava male delle donne. Non voleva figli perché la loro educazione avrebbe interferito con la sua filosofia. Dichiarava di disprezzare qualsiasi forma di violenza e di passione.

È difficile accettare tutto ciò per vero. Non gli era estranea la violenza; i suoi atomi erano in costante e violento movimento. E ci vuol passione per credere in ciò in cui credeva Democrito. Egli rimase attaccato alle sue convinzioni, anche se non gli procurarono nessuna fama. Aristotele lo rispettava, ma Platone, come abbiamo già avuto modo di dire, avrebbe voluto che tutti i suoi libri fossero bruciati. Nella sua città natale Democrito fu eclissato da un altro pensatore,

Protagora, il più eminente dei sofisti, una scuola di filosofi che si «noleggiavano» come maestri di retorica a ricchi giovanotti. Quando Protagora lasciò Abdera per andare ad Atene, vi fu ricevuto entusiasticamente. Democrito, d'altro canto, disse: «Sono venuto ad Atene e nessuno mi conosceva».

Democrito aveva molte altre idee alle quali non abbiamo accennato nella nostra mitica conversazione onirica, che non è altro che un insieme di citazioni dagli scritti del filosofo, vivacizzato con un po' di immaginazione. Mi sono preso delle libertà, ma non con le idee fondamentali di Democrito, anche se mi sono concesso il lusso di cambiare la sua opinione sul valore degli esperimenti. Sono quasi sicuro che non potrebbe resistere al fascino di vedere il suo mitico «coltello» rivivere nelle viscere del Fermilab.

L'indagine di Democrito sul vuoto fu rivoluzionaria. Egli sapeva, per esempio, che non esiste nessun su, giù o centro nello spazio. Anche se questa idea l'aveva già suggerita Anassimandro, è comunque senz'altro una grande conquista per un essere umano nato su questo pianeta, con il suo volgo geocentrico. Il concetto che non esiste né su né giù è ancora difficile per la maggior parte delle persone, nonostante le scene riprese dalle capsule spaziali trasmesse dalla televisione. Una delle convinzioni più avanzate di Democrito era che ci fossero innumerevoli mondi di diversa grandezza. Questi mondi si trovano a distanze irregolari, più in una direzione e meno in un'altra. Alcuni sono in sviluppo, altri in declino. Qui nascono, lì periscono, distrutti da collisioni con altri mondi. Alcuni mondi non hanno vita animale o vegetale, né acqua. Intuizione bizzarra, che tuttavia può essere messa in relazione con le moderne idee cosmologiche associate con quello che viene chiamato «universo inflazionario», dal quale possono scaturire numerosi «universi a bolle». Tutto questo da un «filosofo che ride», che viaggiò per tutto il dominio greco più di duemila anni fa.

Considerando la sua famosa affermazione che tutto è «frutto del caso e della necessità», troviamo lo stesso paradosso, in una forma estrema, nella meccanica quantistica, una delle più grandi teorie del XX secolo. Democrito affermò che collisioni individuali di atomi hanno conseguenze necessarie. Ci sono regole ferree. Tuttavia, quali collisioni avverranno con maggior frequenza, quali atomi prenderanno il sopravvento in una particolare posizione, sono fattori casuali. Portata alla sua logica conclusione, questa concezione implica che la creazione di un sistema Terra-Sole quasi ideale è una questione di fortuna. Nella moderna soluzione quantistica di questo enigma, certezza e regolarità emergono come eventi che sono delle medie rispetto a una distribuzione di reazioni di probabilità variabile. Man mano che il numero dei processi casuali che contribuiscono alla media aumenta, si può prevedere con crescente certezza quel che accadrà. L'idea di Democrito è compatibile con le nostre convinzioni attuali. Non si può dire con certezza a che destino andrà incontro un dato atomo, ma si possono prevedere con esattezza le conseguenze delle collisioni casuali di miliardi di atomi nello spazio.

Anche la sua diffidenza per i sensi è fonte di notevoli intuizioni. Egli osserva che i nostri organi di senso sono fatti di atomi che collidono con gli atomi dell'oggetto che cade sotto di essi, forzando così le nostre percezioni. Come vedremo nel capitolo V, la sua formulazione di questo problema è conforme a un'altra delle grandi scoperte di questo secolo, il principio di indeterminazione di Heisenberg. L'atto di misurare influisce sulla particella che viene misurata. Sì, c'è della poesia in questo.

Che posto occupa Democrito nella storia della filosofia? Non molto elevato, secondo gli standard convenzionali, certamente non elevato, se lo si confronta con quello di uomini che furono praticamente suoi contemporanei, come Socrate, Aristotele e Platone. Alcuni storici trattano la sua teoria atomica come una specie di curiosa nota alla filosofia greca. C'è però almeno un'autorevole opinione di minoranza. Il filosofo inglese Bertrand Russell ha affermato che la filosofia è entrata in declino dopo Democrito e non si è più ripresa fino al Rinascimento. Democrito e i suoi predecessori, ha scritto Russell, furono «impegnati in uno sforzo disinteressato teso a comprendere il mondo». Il loro atteggiamento era «pieno d'immaginazione, di vigore e di gioia dell'avventura. Essi avevano interesse per tutto: meteore ed eclissi, pesci e trombe d'aria, religione e morale; combinavano un penetrante intelletto con una curiosità infantile». Essi non furono superstiziosi, ma genuinamente scientifici, e non furono granché influenzati dai pregiudizi del loro tempo.

Naturalmente Russell era, al pari di Democrito, un serio matematico, e questi tipi vanno a braccetto. È naturale che un matematico abbia una propensione per pensatori rigorosi come Democrito, Leucippo ed Empedocle. Russell rilevò che, anche se Aristotele e altri hanno accusato gli atomisti di non aver spiegato il movimento originario degli atomi, Leucippo e Democrito furono assai più scientifici dei loro critici, proprio perché non si preoccupavano di attribuire un fine all'universo. Gli atomisti sapevano che la causalità deve partire da qualcosa, e che nessuna causa può essere attribuita a questo ori-

ginario qualcosa. Il movimento era semplicemente dato. Gli atomisti si ponevano problemi meccanici a cui davano soluzioni meccaniche. Quando si chiedevano «Perché?», essi intendevano: qual è la *causa* di un evento? Quando i loro successori – Platone, Aristotele, eccetera – si domandavano «Perché?», cercavano il *fine* di un evento. Sfortunatamente, come ha detto Russell, questo secondo indirizzo di ricerca «arriva di solito, prima o poi, a un Creatore, o almeno a un Artefice». Questo Creatore non deve, allora, richiedere una spiegazione, a meno che non si voglia ipotizzare un Super-Creatore e così via. Questo modo di pensare, ha detto Russell, ha cacciato la scienza in un vicolo cieco nel quale è rimasta intrappolata per secoli.

A che punto ci troviamo oggi in rapporto alla Grecia del 400 a.C. circa? L'odierno modello standard guidato dall'esperimento non è certo molto diverso dalla teoria atomica speculativa di Democrito. Possiamo fare tutto nell'universo passato o presente – dalla minestra di pollo alle stelle di neutroni – con soltanto dodici particelle di materia. I nostri a-tomi si dividono in due famiglie: sei quark e sei leptoni. I sei quark si chiamano «su», «giù», «incantato», «strano», «alto» (o «verità») e «basso» (o «bellezza»). I leptoni includono il familiare elettrone, il neutrino elettronico, il muone, il neutrino muonico, il tau e il neutrino tauonico.

Ma si noti che abbiamo detto l'universo «passato o presente». Se parliamo soltanto del nostro ambiente attuale, dai quartieri meridionali di Chicago ai confini dell'universo, possiamo cavarcela egregiamente anche con un minor numero di particelle. Per quanto riguarda i quark, quelli di cui abbiamo veramente bisogno sono il «su» e il «giù», che possono essere usati in diverse combinazioni per formare il nucleo dell'atomo (quello che compare nella tavola periodica). Fra i leptoni, non possiamo fare a meno del buon vecchio elettrone, che «orbita» intorno al nucleo, e del neutrino, che è essenziale in molti tipi di reazioni. Ma perché abbiamo bisogno del muone e delle particelle tau? O del quark «incantato» e del quark «strano», e dei quark più pesanti? Sì, noi possiamo produrli nei nostri acceleratori o osservarli nelle collisioni di raggi cosmici. Ma perché esistono? Diremo di più su questi a-tomi «addizionali» più avanti.

Guardando attraverso il caleidoscopio

Le sorti dell'atomismo hanno conosciuto una serie di alti e bassi, di scatti e sbalzi, prima di arrivare al nostro modello standard. Esso ha avuto inizio con Talete, che diceva che tutto è acqua (totale atomi: 1). Poi arrivò Empedocle con terra-aria-acqua-fuoco (totale: 4). Democrito aveva un fastidioso numero di forme ma un solo concetto (totale: ?). Poi ci fu una lunga pausa storica, anche se gli atomi rimasero un concetto filosofico discusso come tale da Lucrezio, Newton, Boscovich e molti altri. Finalmente gli atomi vennero ridotti a una necessità sperimentale da John Dalton nel 1803. Poi, nelle salde mani dei chimici, il numero degli atomi aumentò: 20, 48 e, a partire dai primi anni di questo secolo, 92. Presto i chimici nucleari cominciarono a crearne di nuovi (totale: 112, in aumento). Lord Rutherford compì un passo gigantesco verso la semplicità quando scoprì (verso il 1910) che l'atomo di Dalton non era indivisibile, ma risultava composto di un nucleo più gli elettroni (totale: 2). Ah, sì, c'era anche il fotone (totale: 3). Nel 1930, si scoprì che il nucleo ospitava sia neutroni sia protoni (totale: 4). Oggi, abbiamo 6 quark, 6 leptoni, 12 bosoni «gauge» e, se volete essere cattivi, potete contare le antiparticelle e i colori, perché i quark si suddividono in tre tonalità (totale: 60).

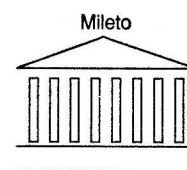
La storia suggerisce che possiamo trovare delle cose, chiamiamole «prequark», che ci conducano a ridurre il numero totale delle unità fondamentali. Ma la storia non ha sempre ragione. L'idea più recente è che stiamo guardando attraverso un vetro appannato, che la proliferazione di «a-tomi» nel nostro modello standard è una conseguenza di come guardiamo. Un giocattolo infantile, il caleidoscopio, mostra delle belle immagini usando specchi per aggiungere complessità a un'immagine semplice. Il disegno di una stella è visto come il prodotto di una lente gravitazionale. Come lo si concepisce ora, il bosone di Higgs – la particella di Dio – può fornire il meccanismo che rivela un mondo semplice, di primordiale simmetria, al di là del nostro, via via sempre più complesso, modello standard.

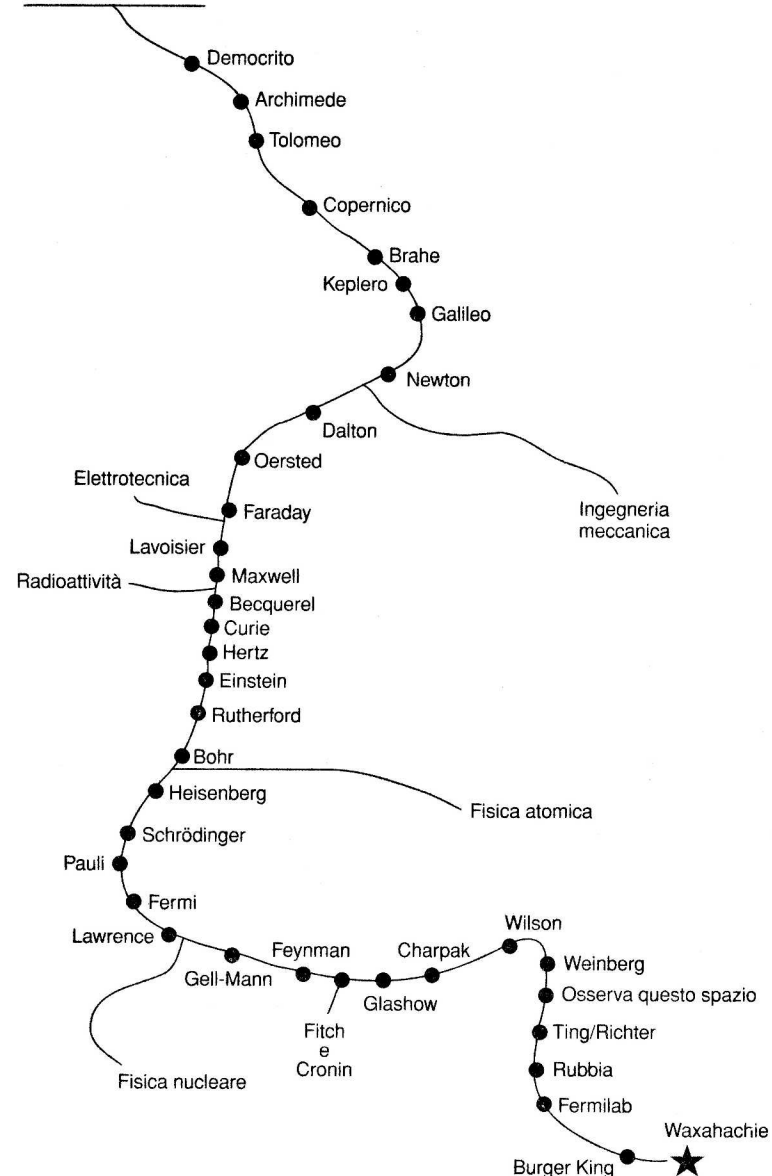
Ciò ci riporta a una vecchia questione filosofica. Questo universo è reale? Se lo è, possiamo conoscerlo? I teorici spesso non afferrano questo problema. Come Democrito, essi accettano semplicemente la realtà oggettiva nel suo valore nominale e badano ai loro calcoli. (Una scelta brillante, se si vuole realizzare qualcosa con penna e taccuino.) Ma a uno sperimentatore, tormentato dalla debolezza dei suoi strumenti e dei suoi sensi, possono venire i sudori freddi nell'impresa di misurare questa realtà, che può rivelarsi infida quando la si attacca con un regolo. A volte, i numeri prodotti da un esperimento sono così strani e inaspettati che possono far rizzare i capelli in testa ai fisici.

Si prenda questo problema della massa. I dati che abbiamo raccolto sulle masse dei quark e delle particelle W e Z sono assolutamente

sconcertanti. I leptoni – l'elettrone, il muone e il tau – ci regalano delle particelle che appaiono identiche in ogni aspetto tranne che per la loro massa. La massa è reale? O è un'illusione, un prodotto dell'ambiente cosmico? Un'opinione che ribolle nella letteratura degli anni Ottanta e Novanta è che qualcosa pervade questo spazio vuoto e conferisce agli atomi un peso illusorio. Questo «qualcosa» si manifesterà un giorno ai nostri strumenti come una particella.

Nel frattempo, niente esiste tranne gli atomi e il vuoto; tutto il resto è opinione.

Posso sentire il vecchio Democrito che sghignazza.

Interludio A

Storia di due città

III
Alla ricerca dell'atomo: la meccanica

A voi che vi state preparando a celebrare il trecentocinquantesimo anniversario della pubblicazione della grande opera di Galileo, il *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, vorrei dire che l'esperienza della Chiesa, durante e dopo il caso Galileo, ha portato a un atteggiamento più maturo e a una più accurata comprensione dell'autorità che le è propria. Ripeto davanti a voi ciò che ho detto davanti alla Pontificia Accademia delle scienze il 10 novembre 1979: «Spero che i teologi, gli studiosi e gli storici, animati da uno spirito di sincera collaborazione, studieranno più approfonditamente il caso Galileo e, in un franco riconoscimento degli errori, da qualunque parte siano stati commessi, dissiperanno la diffidenza che rappresenta ancora, nelle menti di molti, un ostacolo a una feconda concordia fra scienza e fede».

GIOVANNI PAOLO II, 1986

Vincenzo Galilei odiava i matematici, il che può sembrare strano visto che era egli stesso un matematico di provata abilità. Tuttavia, egli era anzitutto e soprattutto un musicista, un liutista di grande fama nella Firenze del XVI secolo. Intorno al 1580, indirizzò le proprie capacità allo studio della teoria musicale e la trovò inadeguata. La colpa, disse Vincenzo, era di un matematico morto da duemila anni, Pitagora.

Pitagora, un mistico, nacque nell'isola greca di Samo un secolo circa prima di Democrito. Passò la maggior parte della sua vita in Italia, dove fondò la setta dei pitagorici, una specie di società segreta i cui membri avevano un culto religioso per i numeri e conducevano un regime di vita governato da una serie di tabù ossessivi. Rifiutavano di mangiare fave o di raccogliere gli oggetti che avevano lasciato cadere. Quando si svegliavano al mattino, si preoccupavano di spianare le lenzuola per cancellare le impronte dei loro corpi. Credevano nella reincarnazione ed evitavano di mangiare carne o di picchiare i cani, perché poteva trattarsi di amici defunti.

Erano ossessionati dai numeri. Credevano che le cose fossero numeri. Non solo che gli oggetti potessero venire enumerati, ma che *fossero* realmente numeri, come 1, 2, 7 o 32. Pitagora concepiva i numeri come figure e arrivò all'idea dei quadrati e dei cubi dei numeri, termini che usiamo ancor oggi. (Egli parlava anche di numeri «oblunghi» e «triangolari», termini che invece non usiamo più.)

Pitagora fu il primo a presagire una grande verità sui triangoli rettangoli. Egli rilevò che *la somma dei quadrati dei cateti è uguale al quadrato dell'ipotenusa*, una formula che viene inculcata in ogni giovane cervello che annaspa in un corso di geometria da Des Moines fino a Ulan-Bator. Questo mi ricorda quando uno dei miei studenti faceva il servizio militare e, con un gruppo di reclute, assisteva a una lezione sul sistema metrico decimale tenuta dal suo sergente.

Sergente: Nel sistema metrico decimale l'acqua bolle a novanta gradi.
Recluta: Chiedo scusa, signore, ma l'acqua bolle a cento gradi.
Sergente: Naturalmente, che stupido. È l'angolo retto che bolle a novanta gradi.

I pitagorici amavano studiare i rapporti, le proporzioni. Essi concepirono l'idea del «rettangolo aureo», la figura perfetta, le cui proporzioni si manifestano nel Partenone come in molte altre strutture greche e si ritrovano nella pittura del Rinascimento.

Pitagora fu il primo personaggio cosmico. Fu lui (e non Carl Sagan) a coniare il termine *kosmos* per riferirsi a tutto quel che c'è nel nostro universo, dagli esseri umani alla Terra, alle stelle che corrono sopra la nostra testa. *Kosmos* è una parola greca intraducibile che denota le qualità dell'ordine e della bellezza. L'universo è un *kosmos*, diceva Pitagora, un tutto ordinato, e ognuno di noi esseri umani è anch'esso un *kosmos* (qualcuno più di altri).

Se Pitagora vivesse oggi, abiterebbe sulle colline di Malibu, o forse a Marin County. Gestirebbe dei ristoranti salutisti accompagnato da uno smanioso seguito di fanciulle nemiche delle fave con nomi come *Sundance Acacia* o *Princess Gaia*. O forse sarebbe professore associato di matematica all'Università della California a Santa Cruz.

Ma sto uscendo dal seminato. Il fatto cruciale della nostra storia è che i pitagorici erano amanti della musica, sulla quale riflettevano la loro ossessione per i numeri. Pitagora credeva che l'armonia musicale dipendesse da «numeri sonori». Egli sosteneva che gli accordi perfetti fossero intervalli della scala musicale esprimibili come rapporti fra i numeri 1, 2, 3 e 4. La somma di questi numeri è 10 che, nella concezione pitagorica del mondo, rappresenta il numero perfetto. I pitagorici portavano i propri strumenti musicali alle loro riunioni, che si trasformavano in vere e proprie *jam-sessions*. Non sappiamo quanto valessero, dal momento che a quel tempo non esistevano registrazioni su compact disc. Ma un critico posteriore avanzò una dotta congettura.

Vincenzo Galilei ipotizzò che, date le loro idee sull'armonia, i pitagorici dovessero essere stati collettivamente duri d'orecchio. Il suo orecchio gli diceva che Pitagora si era completamente sbagliato. Anche altri esperti musicisti del XVI secolo non tenevano in nessun conto questi antichi Greci. Tuttavia, le idee dei pitagorici sopravvissero fino

ai tempi di Vincenzo e i «numeri sonori» rimasero una rispettata componente della teoria, se non della pratica, musicale. Il principale difensore di Pitagora nell'Italia del XVI secolo fu Gioseffo Zarlino, il più importante teorico musicale del suo tempo e maestro di Vincenzo.

Vincenzo e Zarlino si imbarcarono in un'aspra controversia sull'argomento e l'allievo, per provare la correttezza della sua posizione, escogitò un metodo che era rivoluzionario per quei tempi: *fece degli esperimenti*. Sperimentando con corde di differenti lunghezze, o corde di uguale lunghezza ma differenti tensioni, trovò delle nuove relazioni matematiche, non pitagoriche, nella scala musicale. Certuni sostengono che Vincenzo fu il primo a scalzare una legge matematica universalmente accettata mediante la sperimentazione. Come minimo, egli fu all'avanguardia di un movimento che sostituì la vecchia polifonia con la moderna armonia.

Sappiamo che c'era almeno uno spettatore interessato a questi esperimenti musicali. Il figlio maggiore di Vincenzo era presente quando egli misurava e calcolava. Esasperato dal dogma della teoria musicale, Vincenzo si scagliava con il figlio contro la stupidità della matematica. Non conosciamo le sue precise parole, ma posso sentire nella mia mente Vincenzo che strilla qualcosa del tipo di «Dimenticati queste teorie con numeri che non dicono nulla. Ascolta quello che ti dicono le tue orecchie. Che non debba mai nemmeno sentirti dire di voler diventare un matematico!». Ammaestrò bene il ragazzo, facendolo diventare un valente suonatore di liuto e di altri strumenti. Esercitò i sensi del figlio, insegnandogli a rilevare errori nella scansione del tempo, una capacità essenziale per un musicista. Ma egli desiderava che il suo figlio maggiore abbandonasse sia la musica sia la matematica: da tipico padre, Vincenzo voleva che diventasse un medico, che facesse dei guadagni decenti.

L'assistere a quegli esperimenti ebbe sul giovanotto un'influenza maggiore di quanto Vincenzo potesse aver immaginato. Il ragazzo era particolarmente affascinato da un esperimento in cui il padre sottoponeva le sue corde a varie tensioni appendendo pesi diversi alle loro estremità. Quando venivano pizzicate, queste corde si comportavano come pendoli, e ciò può aver suggerito al giovane Galilei le prime riflessioni sui modi caratteristici in cui gli oggetti si muovono in questo universo.

Il nome del figlio era, ovviamente, Galileo. A occhi moderni le sue conquiste appaiono così luminose da non avere uguali in quel periodo storico. Galileo ignorò le diatribe di Vincenzo contro la falsità della matematica pura e diventò professore di matematica. Ma, per quanto amasse il ragionamento matematico, lo mise al servizio dell'osservazione e della misurazione. La sua sagace mescolanza di matematica, osservazione ed esperimento è, infatti, frequentemente citata come il vero inizio del «metodo scientifico».

Galileo, Zsa Zsa e io

Galileo segnò un nuovo inizio. In questo e nel capitolo successivo assisteremo alla nascita della fisica classica. Incontreremo un imponente numero di eroi, fra i quali Galileo, Newton, Lavoisier, Mendeleev, Faraday, Maxwell e Hertz. Ciascuno di essi affrontò il problema di trovare l'unità fondamentale della materia da una nuova angolazione. È un capitolo che mi spaventa. Su tutte queste persone si è scritto e riscritto all'infinito. La fisica è un territorio ben esplorato. Quanto a me, mi sento come il settimo marito di Zsa Zsa Gabor. So che cosa fare, ma come farlo in maniera interessante?

Grazie ai pensatori postdemocritei, nella scienza vi fu un periodo di relativa stasi che perdurò dal tempo degli atomisti fino agli albori del Rinascimento. Questa è una delle ragioni per cui i «secoli bui» sono così bui. Il bello, per quanto riguarda la fisica delle particelle, è che possiamo ignorare quasi duemila anni di pensiero. La logica aristotelica – geocentrica, antropocentrica, religiosa – dominò la cultura occidentale per tutto questo periodo, creando un ambiente sterile per la fisica. Naturalmente, Galileo non spuntò come un fiore nel deserto. Egli teneva in grande considerazione Archimede, Democrito e il poeta filosofo romano Lucrezio. Non vi è dubbio che studiò e utilizzò le teorie di altri predecessori che ora sono noti solo agli studiosi. Galileo accettò (dopo accurate verifiche) la concezione del mondo di Copernico, e ciò determinò il suo futuro personale e politico.

In questo periodo, assisteremo a un progressivo allontanamento dal metodo greco. La «ragion pura» non è più sufficiente. Entriamo in un'epoca di sperimentazione. Come Vincenzo aveva detto a suo figlio, tra il mondo reale e la pura ragione (vale a dire la matematica) ci sono i sensi e, ciò che più importa, la misurazione. Incontreremo diverse generazioni sia di teorici sia di misuratori. Vedremo come l'interazione fra queste opposte tendenze contribuì a costruire un magnifico edificio intellettuale noto come fisica classica. Della loro opera non beneficiarono solo studiosi e filosofi. Dalle loro scoperte emersero tecnologie che cambiarono il modo di vivere degli uomini su questo pianeta.

Naturalmente, i misuratori non sono nulla senza i loro regoli, i loro strumenti. Fu un periodo di straordinari scienziati, ma anche di straordinari strumenti.

Palle e inclinazioni

Galileo si dedicò in particolare allo studio del movimento. Che abbia o no lasciato cadere dei pesi dalla Torre pendente, la sua analisi logica delle relazioni fra distanza, tempo e velocità precedette probabilmente i suoi esperimenti. Galileo studiò come si muovono le cose non lasciando cadere liberamente degli oggetti, ma usando un trucco, un surrogato: il piano inclinato. Giunse alla conclusione che il moto di una palla che rotolava lungo un piano liscio, levigato, doveva avere una stretta relazione con quello di una palla in caduta libera, ma il piano avrebbe avuto l'enorme vantaggio di rallentare il movimento tanto da renderlo misurabile.

In teoria, egli poteva verificare questo ragionamento cominciando con una lievissima inclinazione – sollevando di pochi centimetri un'estremità del suo piano lungo due metri per creare una lieve pendenza – e ripetendo le sue misurazioni con un'inclinazione crescente finché la velocità diventasse troppo elevata per poter essere misurata con precisione. Ciò avrebbe giustificato l'estensione delle sue conclusioni all'inclinazione finale, una caduta libera verticale.

Ebbene, Galileo aveva bisogno di qualcosa per cronometrare le sue sfere rotolanti. La sua visita all'emporio locale per comprare un cronometro a scatto non sortì alcun risultato; l'invenzione era trecento anni di là da venire. Ma qui intervenne l'insegnamento paterno. Come ricorderete, Vincenzo aveva affinato l'orecchio di Galileo per i tempi musicali. Per esempio, una marcia può avere una battuta ogni mezzo secondo. A quella battuta un esperto musicista, come Galileo, può scoprire un errore di circa un sessantaquattresimo di secondo.

Galileo, sperduto in una terra senza cronometri, decise di trasformare il suo piano inclinato in una sorta di strumento musicale. Tese una serie di corde di liuto a intervalli attraverso il piano. Adesso, una palla che rotolava lungo il piano produceva un clic ogni volta che passava sopra una corda. Fece poi scorrere le corde in su e in giù finché la battuta di ciascun intervallo risultò esattamente la stessa al suo orecchio. Intonò un'aria a tempo di marcia, lasciando andare la palla su una battuta, e quando lo «strumento» fu finalmente accordato, la palla colpiva ogni corda di liuto esattamente su battute successive, ciascuna alla distanza di mezzo secondo. Quando Galileo misurò gli spazi fra le corde scoprì – *mirabile dictu* – che essi aumentavano in proporzione geometrica lungo il piano. In altri termini, la distanza dall'inizio alla seconda corda era quattro volte la distanza dall'inizio alla prima corda. La distanza dall'inizio alla terza corda

corrispondeva a nove volte il primo intervallo; la quarta corda era sedici volte più lontana nel piano della prima, e così via, anche se ogni intervallo fra corde rappresentava sempre un mezzo secondo. (I rapporti fra gli intervalli, 1, 4, 9, 16, si possono anche esprimere come quadrati: 1^2, 2^2, 3^2, 4^2, e così via.)

Ma che cosa succede se si solleva un po' il piano rendendo più ripida l'inclinazione? Galileo provò molti angoli, scoprendo la stessa relazione – questa sequenza di quadrati – a ogni inclinazione, dalla più lieve alla meno lieve, finché il movimento non fu troppo veloce perché il suo «orologio» potesse registrare le distanze con sufficiente precisione. Il fatto cruciale è che Galileo dimostrò che un oggetto in caduta non si limita a cadere, ma cade sempre più rapidamente istante dopo istante. Esso *accelera*, e l'accelerazione è costante.

Essendo un matematico, egli escogitò una formula per descrivere questo movimento. La distanza s percorsa da un corpo in caduta è uguale a un numero A moltiplicato per il quadrato del tempo t che esso impiega a percorrere la distanza. Nel vecchio linguaggio dell'algebra, ciò è abbreviato come $s = At^2$. La costante A variava a ogni inclinazione del piano. A rappresenta il concetto essenziale di accelerazione, vale a dire l'aumento della velocità mentre l'oggetto è in caduta. Galileo fu in grado di dedurre che la velocità varia con il tempo in modo più immediato della distanza, aumentando semplicemente in rapporto a esso (anziché con il suo quadrato).

Il piano inclinato, la capacità dell'orecchio esercitato di misurare tempi fino a un sessantaquattresimo di secondo e la capacità di misurare distanze con un'approssimazione di circa tre millimetri, fornirono a Galileo la precisione richiesta dai suoi esperimenti. Successivamente, Galileo inventò un orologio basato sul periodo regolare del pendolo. Oggi, gli orologi atomici al cesio custoditi al National Bureau of Standard misurano il tempo con una precisione superiore a un milionesimo di secondo all'anno! Questi orologi sono superati dagli orologi naturali. Le pulsar astronomiche, che sono stelle di neutroni che ruotano rapidamente emettendo fasci di onde radio attraverso il cosmo con una regolarità cronometrica, possono infatti essere più precise della pulsazione atomica dell'atomo di cesio. Galileo sarebbe rimasto incantato da questo stretto rapporto fra astronomia e atomismo.

Perché la formula $s = At^2$ è così importante?

Per quanto ne sappiamo, allora per la prima volta il movimento fu correttamente descritto in termini matematici, e i concetti fondamentali di accelerazione e velocità vennero accuratamente definiti.

La fisica è lo studio della materia e del movimento. Il moto dei proiettili, quello degli atomi, il turbinio dei pianeti e delle comete devono essere tutti descritti quantitativamente. La matematica di Galileo, confermata dall'esperimento, fornì il punto di partenza.

Perché tutto ciò non sembri troppo liscio, dovremmo notare che l'ossessione di Galileo per la legge della caduta libera durò decenni. In una delle sue pubblicazioni, egli ne diede addirittura una formulazione sbagliata. La maggior parte di noi, essendo fondamentalmente aristotelici (lo sapevi, caro lettore, di essere fondamentalmente aristotelico?), congettturerebbe che la velocità della caduta dipende dal peso della palla. Galileo, con la sua ben nota sagacia, ragionò diversamente. Ma è poi così insensato pensare che i corpi pesanti debbano cadere più velocemente di quelli leggeri? Lo pensiamo perché la natura ci trae in inganno. Galileo, acuto com'era, dovette compiere accurati esperimenti per mostrare che l'*apparente* dipendenza del tempo di caduta di un corpo dal suo peso è un effetto dell'attrito della palla sul piano. Di conseguenza, egli levigò e rilevigò il suo piano per diminuire l'effetto dell'attrito.

La piuma e la moneta

Ricavare una semplice legge fisica da un insieme di misurazioni non è così facile. La natura nasconde la semplicità in una selva di complicate circostanze e il compito dello sperimentatore è di sfrondare queste complicazioni. La legge della caduta libera ne è uno splendido esempio. Nel corso di fisica del primo anno, lasciamo cadere simultaneamente una moneta e una piuma dentro un tubo di vetro. La moneta cade più velocemente e tintinna sul fondo in meno di un secondo. La piuma fluttua lievemente verso il basso, arrivando a destinazione in cinque o sei secondi. Osservazioni del genere portarono Aristotele a postulare la legge che gli oggetti pesanti cadono più velocemente di quelli leggeri. Ora creiamo il vuoto d'aria nel tubo e ripetiamo l'esperimento. La piuma e la moneta impiegano lo stesso tempo a cadere. La resistenza dell'aria offusca la legge della caduta libera. Per andare oltre, e ottenere la legge semplice, dobbiamo rimuovere questa complicazione. Successivamente, se la cosa è importante, potremo tornare sui nostri passi e aggiungere questo effetto per arrivare a una legge più complessa, ma con un più vasto campo di applicazione.

Gli aristotelici pensavano che lo stato «naturale» di un corpo fosse la quiete. Non è forse vero che, se facciamo scivolare una palla

lungo un piano, essa raggiunge lo stato di quiete? Galileo sapeva tutto sulle condizioni imperfette, e questo lo portò a una grande scoperta. Egli leggeva la fisica nei piani inclinati come Michelangelo vedeva dei corpi armoniosi nei blocchi di marmo. Si rese conto, però, che a causa dell'attrito, della pressione dell'aria e di altre condizioni imperfette il piano inclinato non era lo strumento ideale per studiare le forze agenti su vari oggetti. Che cosa accade, pensò, se abbiamo un piano ideale? Come Democrito affilava mentalmente il suo coltello, levigate mentalmente il piano finché non raggiunga un grado di politezza assoluta, del tutto esente da attrito. Collocatelo quindi in una stanza in cui è stato creato il vuoto per eliminare la resistenza dell'aria. Poi estendete il piano all'infinito. Accertatevi che il piano sia assolutamente orizzontale. Ora date un leggero colpetto alla palla, anch'essa perfettamente levigata, che sta sul vostro levigatissimo piano. Fino a dove rotolerà? E per quanto tempo? (Nella misura in cui tutto ciò accade nella mente, l'esperimento è possibile e a buon mercato.)

La risposta è che rotolerà per sempre. Galileo ragionò così: quando un piano, anche un piano materiale imperfetto, viene inclinato verso l'alto, una palla, messa in movimento da una spinta nella parte bassa del piano, procederà sempre più lentamente. Se il piano è inclinato verso il basso, una palla lasciata libera in cima a esso rotolerà sempre più velocemente. Pertanto, usando l'idea intuitiva della continuità dell'azione, Galileo ne concluse che una palla in movimento lungo un piano non aumenterà né diminuirà la velocità, ma continuerà per sempre nello stato di moto originario. Galileo aveva afferrato intuitivamente quella che adesso si chiama prima legge del moto di Newton: un corpo in movimento tende a rimanere in movimento. Le forze non sono necessarie al movimento, ma solo ai mutamenti del movimento. In contrasto con la concezione aristotelica, lo stato naturale di un corpo è il movimento a velocità costante. La quiete è il caso speciale di velocità zero, ma nella nuova concezione questa non è affatto più naturale di qualsiasi altra velocità costante. Per chiunque abbia guidato una macchina o un carro, si tratta di un'idea tutt'altro che intuitiva. Se non pigiate il piede sull'acceleratore o frustate il cavallo, il veicolo si fermerà. Galileo intuì che per trovare la verità dovete attribuire mentalmente condizioni ideali al vostro strumento (cioè guidare la vostra macchina su una strada ghiacciata). È stato il genio di Galileo a capire che si devono rimuovere gli impedimenti naturali, come l'attrito e la resistenza dell'aria, per stabilire un insieme di relazioni fondamentali sul mondo.

Come vedremo, anche la particella di Dio è una complicazione imposta a un universo semplice e bello, forse per nascondere questa abbagliante simmetria a un'umanità ancora immeritevole.

La verità della torre

L'esempio più famoso della capacità di Galileo di eliminare le complicazioni dalla semplicità è la storia della Torre pendente di Pisa. Molti storici dubitano della realtà di questo mitico evento. Stephen Hawking, per esempio, scrive che la storia è «quasi certamente falsa». Perché mai, si chiede infatti Hawking, Galileo si sarebbe affannato a far cadere dei pesi da una torre, non disponendo di mezzi per misurare con precisione il loro tempo di caduta, quando aveva già il piano inclinato per fare esperimenti? Ombre dei Greci! Qui Hawking, il teorico, sta usando la «ragion pura». Questo però non quadra con un tipo come Galileo, un principe degli sperimentatori.

Stillman Drake, il biografo ufficiale di Galileo, ritiene che la vicenda della Torre pendente sia vera per una quantità di fondate ragioni storiche. Ma essa è anche consona alla personalità di Galileo. L'esperimento della torre non fu un vero e proprio esperimento, ma una dimostrazione pubblica, un evento mediale, la prima grande trovata pubblicitaria scientifica. Lo scienziato si esibiva davanti ai suoi critici, nello stesso tempo in cui li smascherava.

Galileo era un tipo molto vivace, non proprio irascibile, ma di temperamento impulsivo, e un terribile avversario nelle sfide. Poteva tirar calci come un mulo quando era infastidito, ed era infastidito dalla stupidità in tutte le sue manifestazioni. Essendo un uomo informale, mise in ridicolo le toghe in uso all'Università di Pisa e scrisse un poemetto satirico intitolato *Contro il portar la toga* che fu molto apprezzato dai professori più giovani e più poveri, che non potevano permettersi questo abbigliamento. (Democrito, che amava le toghe, non digerì affatto il poemetto.) I professori più anziani si divertirono un po' meno. Galileo scrisse anche attacchi ai suoi rivali usando vari pseudonimi. Il suo stile era però facilmente distinguibile e pochi si lasciarono ingannare. Non fa meraviglia che avesse dei nemici.

I suoi avversari intellettuali più accaniti erano gli aristotelici, che credevano che un corpo si muove solo se guidato da qualche forza e che un corpo pesante cade più velocemente di uno leggero perché sollecitato da una maggior attrazione verso la Terra. Il pensiero di sottoporre a verifica queste idee non sfiorava loro neppure la mente. Gli studiosi aristotelici dominavano in maniera pressoché incontrastata l'Università di Pisa e anche la maggior parte delle università italiane. Come potete immaginare, Galileo non era uno dei loro scienziati preferiti.

La trovata della Torre pendente fu diretta proprio a questo gruppo di eruditi. Hawking ha ragione a sostenere che non si sarebbe trattato di un esperimento ideale. Ma fu un evento. E come in ogni evento inscenato, Galileo sapeva in anticipo come sarebbe andata a finire. Mi sembra di vederlo mentre alle tre del mattino, nella più totale oscurità, si arrampica sulla torre e molla una coppia di palle di piombo in testa al suo assistente borsista. «Dovresti sentire le palle colpirti simultaneamente» gli urla. «Grida se quella grande ti colpisce per prima.» Ma non aveva realmente bisogno di farlo, perché aveva già concluso ragionando che entrambe le palle avrebbero dovuto colpire il suolo nello stesso istante.

Ecco come funzionava la sua mente: supponiamo, disse, che Aristotele abbia ragione. La palla pesante atterrerà per prima, il che significa che accelera in misura maggiore. Leghiamo allora la palla leggera alla palla pesante. Se la palla leggera è effettivamente più lenta, tratterrà la palla pesante facendola cadere più lentamente. Tuttavia, legandole insieme abbiamo creato un oggetto ancor più pesante, e questo oggetto dovrebbe cadere più velocemente di ciascuna palla individualmente. Come risolvere questo enigma? Solo una soluzione soddisfa tutte le condizioni: entrambe le palle devono cadere alla stessa velocità. Questa è l'unica conclusione che risolve l'enigma *più lento/più veloce*.

La storia racconta che Galileo passò buona parte del mattino a far cadere delle palle di piombo dalla torre, dimostrando la sua asserzione agli osservatori interessati e facendo scappare a gambe levate tutti gli altri. Fu abbastanza accorto da non usare una piuma e una moneta, ma dei pesi diseguali di forma molto simile (come una palla di legno o una sfera di piombo cava dello stesso raggio) per pareggiare approssimativamente la resistenza dell'aria. Il resto, come si suol dire, è storia. Galileo dimostrò che la caduta libera è del tutto indipendente dalla massa (anche se non sapeva perché; ci sarebbe voluto Einstein, nel 1915, per capirlo veramente). Gli aristotelici impararono una lezione che non avrebbero mai dimenticato, o perdonato.

Questa è scienza o spettacolo? Un po' d'entrambi. Gli sperimentatori non sono i soli ad avere questa inclinazione. Richard Feynman, il grande teorico (che mostrò sempre un vivo interesse per gli esperimenti), si impose agli occhi del pubblico quando divenne membro della commissione d'indagine sul disastro dello shuttle *Challenger*.

Come ricorderete, esplose una controversia sulla capacità degli anelli a O dello shuttle di resistere alle basse temperature. Feynman pose termine alla disputa con un semplice gesto: mentre le telecamere lo inquadravano, lasciò cadere un frammento di uno degli anelli in questione in un bicchiere d'acqua gelata e lasciò che il pubblico assistesse alla sua perdita di elasticità. Ebbene, non vi viene il sospetto che Feynman, come Galileo, conoscesse in anticipo ciò che doveva succedere?

In effetti, negli anni Novanta l'esperimento della torre di Galileo è tornato d'attualità con un rinnovato rilievo. La questione è connessa alla possibilità che vi sia una «quinta forza», un'ipotetica appendice alla legge della gravitazione di Newton, che produrrebbe una differenza infinitesimale quando vengono lasciate cadere, per esempio, una palla di rame e una di piombo. La differenza nel tempo di caduta per, diciamo, cento metri, potrebbe essere meno di un miliardesimo di secondo, impensabile ai tempi di Galileo, ma una sfida tutt'altro che impossibile per la tecnologia di oggi. Finora, le prove in favore dell'esistenza della «quinta forza», comparsa alla fine degli anni Ottanta, si sono assottigliate fino a svanire, ma tenete d'occhio il vostro giornale per gli aggiornamenti.

Gli atomi di Galileo

Che cosa pensava Galileo degli atomi? Influenzato da Archimede, Democrito e Lucrezio, Galileo era istintivamente un atomista. Egli rifletté e scrisse sulla natura della luce e della materia per molti decenni, specialmente nel *Saggiatore*, del 1623, e nella sua ultima opera, i *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*. Galileo sembrava credere che la luce consistesse di corpuscoli puntiformi e che la materia avesse una costituzione analoga.

Galileo chiamava gli atomi «i quanti più piccoli». Successivamente, parlò di un numero infinito di atomi separati da un'infinità di vuoti. La concezione meccanicistica è strettamente legata alla matematica degli infinitesimi, che precorse il calcolo che sarebbe stato inventato sessant'anni dopo da Newton. Qui abbiamo un ricco filone di paradossi. Prendiamo un semplice cono circolare – un berretto da somaro? – e immaginiamo di affettarlo in senso orizzontale, cioè parallelamente alla sua base. Esaminiamo due fette contigue. La parte superiore della fetta inferiore è un cerchio e la parte inferiore della fetta superiore è ancora un cerchio. Poiché in precedenza erano a diretto contatto, punto a punto, esse avevano lo stesso raggio. Tuttavia, man mano che procediamo ad affettarlo, il cono diventa sempre

più piccolo; come possono dunque i due cerchi essere lo stesso cerchio? Tuttavia, se ogni cerchio è composto di un numero infinito di atomi e vuoto, si può pensare che il cerchio superiore contenga un numero minore, benché ancora infinito, di atomi. Non è vero? Ricordatevi che siamo intorno al 1630 e che si tratta di idee estremamente astratte, idee che precedono di quasi duecento anni un controllo sperimentale. (Un modo di dissolvere questo paradosso è di chiedere qual è lo spessore del coltello usato per affettare il cono. Mi pare di sentire ancora Democrito che sghignazza.)

Nei *Discorsi* Galileo presenta le sue ultime meditazioni sulla struttura atomica. Secondo storici recenti, in questa ipotesi gli atomi sono ridotti a punti astrattamente matematici, privi di dimensione, chiaramente inscindibili e indivisibili, ma mancanti delle forme che Democrito aveva loro attribuito.

Qui Galileo si spinge vicino alla versione più moderna di questa idea, fondata sull'esistenza dei quark e dei leptoni puntiformi.

Acceleratori e telescopi

I quark sono ancora più astratti e difficili da visualizzare degli atomi. Nessuno ne ha mai «visto» uno, dunque come possono esistere? La nostra evidenza è indiretta. Le particelle collidono in un acceleratore. Sofisticate apparecchiature elettroniche ricevono ed elaborano gli impulsi elettrici generati dalle particelle in una varietà di sensori nel rivelatore. Un computer interpreta gli impulsi elettronici provenienti dal rivelatore, riducendoli a un mucchio di zero e uno, e invia questi risultati a un monitor nella stanza di controllo. Noi guardiamo la rappresentazione di zero e uno e diciamo «Porca vacca, un quark!». Sembra così inverosimile al profano. Come possiamo essere così sicuri? Non potrebbe essere stato l'acceleratore o il rivelatore, o il computer, o il filo che collega il computer al monitor a «fabbricare» il quark? Dopotutto, noi non possiamo mai vedere i quark con i nostri propri occhi. Ah, i tempi in cui la scienza era più semplice! Non sarebbe bello tornare nel XVI secolo? Chiedetelo a Galileo.

Secondo le sue dichiarazioni, Galileo costruì un enorme numero di telescopi. Egli stesso ci dice di aver provato il suo telescopio centomila volte su centomila stelle e altri oggetti, finché finì per fidarsi dello strumento. Ebbene, io ho questa immagine mentale. C'è Galileo con tutti i suoi studenti. Sta guardando fuori dalla finestra con il suo telescopio, descrivendo quello che vede, mentre tutti scribacchiano appunti: «Ecco un albero. Ecco qui un ramo e là una foglia». Dopo che

ha riferito loro quanto visto attraverso il telescopio, salgono tutti sui loro cavalli o carrozze – o forse su un autobus – e attraversano il campo per guardare l'albero da vicino e confrontarlo con la descrizione di Galileo. Ecco come si calibra uno strumento. Si ripete questa operazione diecimila volte. Un critico di Galileo descrive così la meticolosità delle verifiche: «Se seguo queste esperienze su oggetti terrestri, il telescopio fa miracoli. Anche se si interpone fra l'occhio datoci da Dio e l'oggetto datoci da Dio, tuttavia non ci inganna. D'altra parte, se si guarda il cielo, si vede una stella. E se si guarda attraverso il telescopio, se ne vedono due. Questo è un vero e proprio fallimento!».

D'accordo, queste non sono proprio le sue esatte parole. Ma un critico usò parole del genere per mettere in discussione l'affermazione di Galileo che Giove ha quattro lune. Poiché il telescopio consentiva di vedere più di quanto fosse possibile a occhio nudo, doveva essere menzognero. E un professore di matematica congedò Galileo dicendo che anch'egli avrebbe potuto scoprire quattro lune di Giove, se avesse avuto abbastanza tempo «per metterle dentro una lente».

Chiunque usi uno strumento si scontra con questo problema. Lo strumento sta «fabbricando» i risultati? I critici di Galileo sembrano insensati al giorno d'oggi, ma erano degli sciocchi ostinati o soltanto dei conservatori scientifici? Senza dubbio, un po' l'uno e un po' l'altro. Nel Seicento si credeva che l'occhio avesse un ruolo attivo nella visione; le pupille, dateci da Dio, interpretavano il mondo per noi. Oggi sappiamo che l'occhio non è niente di più che una lente con un gruppo di recettori che trasmettono informazioni alla corteccia visiva del nostro cervello, dove noi «vediamo» realmente. L'occhio, in effetti, è un mediatore fra l'oggetto e il cervello, esattamente come il telescopio. Portate gli occhiali? State già producendo delle modifiche. Infatti, fra i cristiani devoti e i filosofi dell'Europa del XVI secolo gli occhiali erano considerati quasi sacrileghi, anche se circolavano da trecento anni. Una notevole eccezione fu Keplero, che era religiosissimo e tuttavia portava gli occhiali perché lo aiutavano a vedere meglio; e fu una fortuna, visto che diventò il più grande astronomo del suo tempo.

Accettiamo l'idea che uno strumento ben calibrato possa fornire una buona approssimazione alla realtà: altrettanto buona dello strumento ultimo, il nostro cervello. Anche il cervello, a volte, deve essere calibrato per compensare le distorsioni. Per esempio, anche se avete dieci decimi di vista, qualche bicchiere di vino può raddoppiare il numero di amici intorno a voi.

Il Carl Sagan del Seicento

Galileo contribuì a spianare la strada all'accettazione degli strumenti, un'impresa sulla cui importanza per la scienza e la sperimentazione non si insisterà mai abbastanza. Che tipo d'uomo era Galileo? Si presenta come un pensatore profondo, dotato di una mente sottile, capace di sprazzi intuitivi che farebbero invidia a qualsiasi fisico teorico contemporaneo, ma con un'energia e un'abilità tecnica che andava dalla molatura delle lenti alla costruzione di diversi strumenti, fra cui il telescopio, il microscopio composto e l'orologio a pendolo. Politicamente, oscillò fra il docile conservatorismo e gli audaci, sferzanti attacchi ai suoi avversari. Deve essere stato un mostro di impegno e un vulcano di attività, visto che lasciò un'enorme corrispondenza e monumentali volumi di opere pubblicate. Fu un divulgatore, che tenne affollatissime lezioni pubbliche dopo l'avvistamento della supernova del 1604, e scrisse in un lucido latino volgarizzato. Nessuno è arrivato altrettanto vicino a essere il Carl Sagan della sua epoca. Non molte facoltà gli avrebbero garantito la cattedra, tanto era vigoroso il suo stile e stringenti le sue critiche, almeno prima della condanna.

Galileo era un fisico completo? Tanto quanto si può esserlo, visto che combinava consumate abilità sia di sperimentatore sia di teorico. Se ha avuto dei difetti, li ha avuti dal lato speculativo. Anche se questa combinazione era relativamente comune nei secoli XVIII e XIX, nell'attuale era della specializzazione è piuttosto rara. Nel XVII secolo, molto di ciò che si chiamava «teoria» era in così stretto rapporto con l'esperimento da sfidare qualsiasi separazione. Vedremo presto il vantaggio di avere un grande sperimentatore seguito da un grande teorico. In effetti, al tempo di Galileo c'era già stata una simile, fondamentale successione.

L'uomo senza naso

Torniamo indietro per un istante, dal momento che nessun libro su strumento e pensiero, esperimento e teoria, è completo senza due nomi che stanno insieme come Marx ed Engels, Emerson e Thoreau o Gianni e Pinotto. Sto parlando di Brahe e Keplero. Essi furono, a rigor di termini, degli astronomi, non dei fisici, ma meritano una breve digressione.

Tycho Brahe fu uno dei più bizzarri personaggi della storia della scienza. Questo nobile danese, nato nel 1546, fu il principe dei misuratori. A differenza dei fisici atomisti, che guardavano alla terra, egli

guardava ai cieli e lo fece con una precisione senza precedenti. Brahe costruì ogni sorta di strumenti per misurare le posizioni delle stelle, dei pianeti, delle comete e della Luna. Mancò di una ventina d'anni l'invenzione del telescopio, e così costruì elaborati strumenti d'osservazione – semicerchi azimutali, regoli tolemaici, sestanti di ottone, quadranti azimutali, regoli parallattici – che lui e i suoi assistenti usavano a occhio nudo per determinare le coordinate delle stelle e di altri corpi celesti. La maggior parte di queste varianti degli odierni sestanti consisteva di bracci incrociati collegati da archi. Gli astronomi usavano i quadranti come fucili, allineando le stelle attraverso mirini metallici fissati alle estremità dei bracci. Gli archi che connettevano i bracci funzionavano come i goniometri che si usano a scuola, consentendo agli astronomi di misurare l'angolo formato dall'orizzonte e la stella, pianeta o cometa che si osservava.

Anche se non c'era nulla di particolarmente nuovo nella concezione su cui si fondavano gli strumenti di Brahe, egli definì lo stato dell'arte. Sperimentò con differenti materiali. Trovò come far ruotare facilmente questi ingombranti aggeggi sul piano verticale o orizzontale e, al tempo stesso, come fissarli in una determinata posizione in modo da poter seguire dallo stesso punto, notte dopo notte, il percorso degli oggetti celesti. Ma, soprattutto, gli strumenti di misura di Brahe furono *grandi*. Come vedremo arrivando all'epoca moderna, grande significa di solito, anche se non sempre, migliore. Lo strumento più famoso di Brahe fu il quadrante a muro, che aveva un raggio di sei metri! Ci vollero quaranta uomini robusti per sistemarlo: un vero e proprio Super Collisore dei suoi tempi. I gradi segnati sul suo arco erano così ben distanziati che Brahe era in grado di dividere ciascuno dei sessanta minuti di arco contenuti in ogni grado in sei suddivisioni di dieci secondi ciascuna. In termini più semplici, il margine di errore di Brahe era dell'ampiezza di un ago tenuto alla distanza di un braccio. E tutto questo a occhio nudo! Per darvi un'idea della sua personalità, dentro l'arco del quadrante c'era un ritratto a grandezza naturale dello stesso Brahe.

Voi penserete che una simile pignoleria stia a indicare un bel tipo di secchione. E in effetti Tycho Brahe lo era. La sua caratteristica più insolita era il naso, o meglio, la mancanza di naso. Quando era uno studente di vent'anni, si imbarcò in una furiosa disputa su una questione matematica con un collega di nome Manderup Parsbjerg. La disputa, che avvenne durante un ricevimento in casa di un professore, divenne talmente incandescente che gli amici dovettero separarli. (Va bene, forse era un po' secchione, visto che si azzuffava per le formule piuttosto che per le ragazze.) Una settimana dopo, Brahe e il suo rivale si incontrarono di nuovo a una festa di Natale, esagerarono un po' con il bere e ricominciarono la disputa matematica. Questa volta non si riuscì a calmarli. Si diedero appuntamento in un posto buio davanti a un cimitero e si affrontarono spada alla mano. Parsbjerg concluse rapidamente il duello tagliando una bella fetta del naso di Brahe.

Questo episodio avrebbe ossessionato Brahe per tutta la vita. Ci sono due aneddoti sulle sue iniziative nel campo della chirurgia plastica. Il primo, molto probabilmente apocrifo, racconta che egli commissionò una collezione completa di nasi artificiali realizzati in diversi materiali per diverse occasioni. Ma la versione dei fatti accettata dalla maggior parte degli storici è quasi altrettanto suggestiva. Secondo quest'ultima, Brahe ordinò un naso permanente fatto d'oro e d'argento, abilmente dipinto e sagomato per imitare un naso vero. Si dice che egli portasse con sé un vasetto di colla che usava quando la protesi cominciava a traballare. Il naso era bersaglio di canzonature. Un avversario scientifico affermò che Brahe aveva fatto le sue osservazioni astronomiche con il naso, usandolo come un mirino.

Nonostante queste difficoltà, Brahe ebbe un vantaggio su molti scienziati odierni, la sua nobile nascita. Egli fu in amicizia con il re di Danimarca Federico II e, dopo essere diventato famoso in seguito all'osservazione di una supernova nella costellazione di Cassiopea, ne ricevette in dono l'isola di Ven, nel Sund, da usare come osservatorio. Gli fu altresì concesso il governo di tutti gli abitanti dell'isola, le rendite derivanti da essa e ulteriori fondi dalle casse reali. In questo modo, Tycho Brahe diventò il primo direttore di laboratorio del mondo. E che direttore! Con le sue rendite, un finanziamento reale e la sua fortuna personale, egli condusse un'esistenza degna di un re. Perse soltanto i vantaggi di avere a che fare con i centri di finanziamento dell'America del XX secolo.

L'isola, di ottocento ettari, divenne il paradiso degli astronomi, dotata com'era di laboratori per gli artigiani che costruivano gli strumenti, di un mulino a vento, di una cartiera e di circa sessanta stagni pescosi. Per se stesso, Brahe costruì una magnifica dimora-osservatorio sul punto più alto dell'isola. La chiamò Uraniborg, «castello celeste», e la munì di una cinta muraria che racchiudeva una stamperia, le stanze della servitù e rifugi per i suoi cani da guardia, senza contare giardini fioriti, serre e circa trecento alberi.

Brahe finì per lasciare l'isola in circostanze men che piacevoli dopo che il suo benefattore, il re Federico, morì di un eccesso di Carls-

berg o di qualsiasi altra bevanda fosse popolare in Danimarca nel Seicento. Il feudo di Ven tornò alla corona e, successivamente, il nuovo re donò l'isola a una certa Karen Andersdatter, una signora che aveva incontrato a una festa di nozze. Questo serva di lezione a tutti i direttori di laboratorio per quanto riguarda la loro condizione nel mondo e la loro insostituibilità agli occhi dei potenti. Fortunatamente, Brahe cadde in piedi, trasportando i suoi dati e i suoi strumenti in un castello vicino a Praga dove trovò ospitalità per continuare la sua opera.

Fu la regolarità dell'universo a stimolare l'interesse di Brahe per la natura. A quattordici anni, rimase affascinato dall'eclissi totale di Sole prevista per il 21 agosto 1560. Come poteva l'uomo conoscere i movimenti delle stelle e dei pianeti così bene da prevedere le loro posizioni con anni d'anticipo? Brahe lasciò un'enorme eredità: un catalogo delle posizioni di esattamente mille stelle fisse. Questo superò il classico catalogo di Tolomeo e abbatté molte delle vecchie teorie.

Un grande pregio della tecnica sperimentale di Brahe fu la sua attenzione per gli errori di misurazione. Cosa senza precedenti nel 1580, egli insisteva sul fatto che le misurazioni dovessero venire ripetute molte volte e che ogni misurazione fosse accompagnata da una stima della sua accuratezza. Fu molto in anticipo sui tempi nella cura di presentare i dati insieme con i limiti della loro affidabilità.

Come misuratore e osservatore, Brahe non ebbe rivali; come teorico, invece, lasciò molto a desiderare. Nato esattamente tre anni dopo la morte di Copernico, non accettò mai completamente il sistema copernicano, secondo il quale la Terra è in orbita intorno al Sole e non viceversa, come aveva affermato Tolomeo molti secoli prima. Le osservazioni compiute gli dimostrarono che il sistema tolemaico non funzionava, ma egli, con la sua formazione di aristotelico, non poté mai indursi a credere che la Terra ruotasse, né riuscì mai ad abbandonare la credenza che fosse al centro dell'universo. Dopotutto, egli pensò, se la Terra si muovesse realmente e si sparasse una palla di cannone nella direzione della sua rotazione, questa dovrebbe andare più lontano che se fosse sparata nella direzione opposta, il che non accade. Così Brahe arrivò a un compromesso: la Terra stava immobile al centro dell'universo ma, contrariamente al sistema tolemaico, i pianeti compivano la loro rivoluzione intorno al Sole, che a sua volta orbitava intorno al nostro pianeta.

Il mistico si libera

Durante la sua carriera, Brahe ebbe molti eccellenti assistenti. Il più brillante di tutti fu uno strano tipo di matematico-astronomo mistico che si chiamava Giovanni Keplero. Da devoto luterano tedesco, Keplero avrebbe preferito diventare prete, se la matematica non gli avesse offerto un modo di sbarcare il lunario. In verità, egli non riuscì a superare gli esami di qualifica ministeriale e scelse, quasi casualmente, di occuparsi di astronomia, con astrologia come materia complementare. Anche così, era destinato a diventare il teorico che avrebbe scorto verità semplici e profonde nella montagna dei dati frutto dell'osservazione di Brahe.

Keplero, protestante in tempi sfavorevoli (la Controriforma dilagava in Europa), fu un uomo gracile, nevrotico, miope, con nulla della sicurezza di sé di un Brahe o di un Galileo. Anche la sua famiglia era un tantino insolita. Il padre era un mercenario, la madre fu processata come strega, e lo stesso Giovanni si occupò per parecchio tempo di astrologia. Fortunatamente, vi era piuttosto versato, ed essa contribuì a pagargli i conti. Nel 1595, compilò un calendario per la città di Graz che prediceva freddo intenso, rivolte contadine e invasioni dei Turchi, tutti eventi che si verificarono puntualmente. Per essere onesti verso Keplero, egli non era il solo a occuparsi di astrologia. Galileo aveva fatto oroscopi per i Medici, e anche Brahe si dilettò in quest'arte, anche se con non molto successo: dall'eclissi di Luna del 28 ottobre 1566 egli predisse la morte del sultano Solimano il Magnifico che, disgraziatamente, a quella data era già defunto.

Brahe trattava piuttosto male il suo assistente, più come uno specializzando, ciò che Keplero in effetti era, che come un pari, ciò che certamente meritava di essere. Il sensibile Keplero si irritava alle offese, e i due ebbero molti contrasti e altrettante riconciliazioni prima che Brahe arrivasse ad apprezzarne l'intelligenza.

Nell'ottobre del 1601, Brahe partecipava a un banchetto e, come era suo costume, aveva bevuto troppo. Secondo la rigida etichetta del tempo, lasciare la tavola durante il pranzo era considerato un atto di maleducazione, e quando alla fine egli si precipitò in bagno era troppo tardi. «Qualcosa d'importante» era esploso dentro di lui. Undici giorni più tardi era morto. Avendo già nominato Keplero suo primo assistente, sul letto di morte Brahe gli lasciò in eredità tutti i dati che aveva raccolto nella sua luminosa carriera e lo scongiurò di usare la sua mente analitica per creare una grande sintesi che avrebbe fatto progredire la comprensione dei fenomeni celesti. Natural-

mente, Brahe aggiunse che si aspettava che seguisse l'ipotesi ticonica di un universo geocentrico.

Keplero consentì alla volontà del morente, senza dubbio con le dita incrociate, perché pensava che il sistema di Brahe fosse una pazzia. Ma i dati! I dati erano ineguagliabili. Keplero li studiò attentamente, cercando di trovare dei fattori costanti nel movimento dei pianeti. Egli rifiutava tanto il sistema ticonico quanto quello tolemaico per la loro goffaggine. Ma doveva pur cominciare da qualche parte. Così scelse come modello la teoria copernicana perché, con il suo sistema di orbite sferiche, era la cosa più elegante che ci fosse in circolazione.

Il mistico che albergava in Keplero adottò anche l'idea della centralità del Sole, che non solo illuminava tutti i pianeti ma forniva una forza o, come si diceva allora, un «motore» che rendesse conto dei loro spostamenti. Egli non sapeva come ciò avvenisse – congetturava che si trattasse di qualcosa di simile al magnetismo – ma spianò la strada a Newton. Keplero fu tra i primi a sostenere che era necessaria una forza per dare un senso al sistema solare.

Cosa altrettanto importante, egli trovò che il sistema copernicano non quadrava del tutto con i dati di Brahe. Il vecchio brontolone danese era stato un buon maestro, instillando in Keplero il metodo induttivo: crea una buona base di osservazioni e solo allora risali alle cause delle cose. Nonostante il suo misticismo e la sua venerazione, per non dire ossessione, per le forme geometriche, Keplero si attenne fedelmente ai dati. Egli uscì da questo studio delle osservazioni raccolte da Brahe – specialmente dei dati relativi a Marte – con tre leggi che regolano il moto dei pianeti e che, quasi quattrocento anni dopo, sono ancora la base della moderna astronomia planetaria. Non voglio entrare nei dettagli di queste leggi, tranne che per dire che la prima distrusse la seducente concezione copernicana delle orbite circolari, un'idea che non era mai stata messa in discussione dai tempi di Platone. Keplero stabilì che, nei loro percorsi orbitali, i pianeti descrivono traiettorie a forma di ellissi di cui il Sole occupa uno dei fuochi. L'eccentrico luterano salvò il copernicanesimo liberandolo dagli ingombranti epicicli dei Greci; e vi riuscì assicurandosi che le sue teorie quadrassero con le osservazioni di Brahe al preciso minuto di arco.

Ellissi! Matematica pura. O si tratta di natura pura? Se, come scoprì Keplero, i pianeti si muovono in perfette ellissi con il Sole posto in uno dei fuochi, allora la natura deve amare la matematica. Qualcuno – forse Dio – guarda sulla Terra e dice: «Mi piace la forma matematica». È facile dimostrare l'amore della natura per le forme matematiche. Si prenda un sasso e lo si lanci. Esso descrive una parabola quasi perfetta. Se non ci fosse l'aria, sarebbe una parabola perfetta. Oltre a possedere un'intelligenza matematica, l'Onnipotente è generosa: nasconde la complessità quando la mente non è preparata a coglierla. Al giorno d'oggi, sappiamo che le orbite non sono ellissi perfette (a causa dell'attrazione reciproca dei pianeti), ma le deviazioni sono troppo piccole perché si potessero rilevare con gli apparecchi congegnati da Brahe.

Il genio di Keplero fu spesso oscurato, nei suoi libri, da dosi massicce di zavorra spirituale. Egli credeva che le comete fossero presagio di sventura, che l'universo fosse diviso in tre regioni corrispondenti alle tre persone della Santa Trinità, e che le maree fossero il respiro della Terra, considerata simile a un gigantesco organismo vivente. (L'idea della Terra come organismo è stata risuscitata oggi nella forma dell'«ipotesi di Gaia».)

Anche così, Keplero ebbe una mente eccelsa. Quell'uomo tutto d'un pezzo di Sir Arthur Eddington, uno dei fisici più eminenti del suo tempo, lo definì nel 1931 «il precursore della fisica teorica moderna». Lo scienziato lodò Keplero per il suo atteggiamento vicino a quello dei teorici dell'età quantistica. Secondo Eddington, Keplero non avrebbe cercato un meccanismo concreto per spiegare il sistema solare, ma sarebbe stato «guidato dalla sensibilità per la forma matematica, da un istinto estetico per l'armonia delle cose».

Il papa a Galileo: «Sei finito!»

Nel 1597, molto prima di aver sistemato i dettagli importuni, Keplero scrisse a Galileo esortandolo a sostenere il sistema copernicano. Con il suo tipico fervore religioso, egli disse allo scienziato italiano: «Abbi fede e va' avanti». Galileo rifiutò di uscire dal recinto tolemaico. Aveva bisogno di prove. La prova fu fornita da uno strumento: il telescopio.

Le notti fra il 4 e il 15 gennaio 1610 devono essere ricordate fra le più importanti nella storia dell'astronomia. In queste notti, con l'aiuto di un nuovo e perfezionato telescopio da lui stesso costruito, Galileo vide, seguì e misurò quattro piccole «stelle» che si muovevano in prossimità del pianeta Giove. Egli fu indotto a concludere che questi corpi si muovevano in orbite circolari intorno al pianeta. Questa conclusione convertì Galileo al copernicanesimo. Se dei corpi possono orbitare intorno a Giove, allora l'idea che tutte le stelle e i pianeti orbitino intorno alla Terra è sbagliata. Come molti neofiti, sia di una convinzione scientifica sia di un credo religioso o politico, egli diventò un incrollabile e accanito difensore dell'astronomia copernica-

na. La storia attribuisce il merito a Galileo, ma dobbiamo anche rendere onore al telescopio che, nelle sue abili mani, dischiuse i cieli.

La lunga e intricata vicenda del conflitto di Galileo con l'autorità dominante è stata più volte raccontata. La Chiesa lo condannò al carcere a vita per le sue idee astronomiche. (La pena fu poi commutata negli arresti domiciliari a vita.) Bisognò aspettare il 1822 perché un papa dichiarasse ufficialmente che il Sole poteva trovarsi al centro del sistema solare, e il 1985 perché il Vaticano riconoscesse che Galileo era un grande scienziato e che era stato trattato ingiustamente dalla Chiesa.

La «spugna solare»

Galileo si rese colpevole di un'eresia meno famosa, un'eresia vicina al cuore del nostro mistero più delle orbite di Marte e di Giove. Nella sua prima spedizione scientifica a Roma per riferire sulle scoperte effettuate nel campo dell'ottica, egli portò con sé una scatoletta contenente frammenti di una roccia scoperta da alcuni alchimisti bolognesi. Era una roccia particolare, che al buio risplendeva. Oggigiorno, questo minerale luminoso è conosciuto come solfuro di bario. Ma nel 1611 gli alchimisti lo chiamavano con il nome molto più poetico di «spugna solare».

Galileo portò a Roma dei frammenti di «spugna solare» per aiutarsi nel suo passatempo preferito: mettere una spina nel fianco dei suoi colleghi aristotelici. Gli aristotelici non fecero a tempo a sedersi al buio, osservando il bagliore del solfuro di bario, che afferrarono l'intento del loro insidioso collega. La luce era una *cosa*. Galileo aveva tenuto la roccia al sole, poi l'aveva messa al buio e la luce si era trasmessa e conservata in essa. Ciò smascherava l'idea aristotelica che la luce non fosse nient'altro che una proprietà di un mezzo illuminante di natura incorporea. Galileo aveva separato la luce dal suo mezzo, portandola in giro a suo piacere. Per un cattolico aristotelico era come dire che si poteva prendere la purezza della Santa Vergine e trasferirla in un mulo o in una pietra. E di che cosa era fatta esattamente la luce? Di corpuscoli invisibili, congetturò Galileo. Particelle! La luce possedeva un'azione meccanica. Poteva essere trasmessa, investire oggetti, esserne riflessa, penetrarli. L'aver compreso che la luce era di natura corpuscolare portò Galileo ad accettare l'idea di atomi *indivisibili*. Egli non sapeva bene come funzionasse la «spugna solare», ma si poteva pensare (anche se Galileo non aderiva in tutto e per tutto a questa teoria) che una particolare roccia può attrarre corpuscoli luminosi come un magnete attrae la limatura di ferro. In

ogni caso, idee del genere aggravarono la già precaria posizione di Galileo nei confronti dell'ortodossia cattolica.

L'eredità storica di Galileo sembra inestricabilmente legata alla religione e alla Chiesa, ma egli non si sarebbe considerato un eretico di professione, né tantomeno un santo ingiustamente accusato. Per quanto ci riguarda, egli fu un fisico – un grande fisico – molto al di là della sua difesa del copernicanesimo. Aprì nuove vie in molti campi. Combinò gli esperimenti con il ragionamento matematico. Quando un oggetto si muove, disse, è importante quantificarne il movimento con un'equazione matematica. Egli si chiedeva sempre: «Come si muovono le cose? Come? Come?». E mai: «Perché? Perché questa sfera cade?». Era consapevole di limitarsi a descrivere il movimento, un compito abbastanza difficile per il suo tempo. Democrito avrebbe potuto dire, a mo' di battuta, che Galileo voleva lasciare qualcosa da fare a Newton.

Il sovrintendente della Zecca

Clementissimo Signore,
sto per essere assassinato, anche se voi forse potete non crederlo, ma è vero. Sarò assassinato nel peggiore dei modi, cioè di fronte alla Giustizia, a meno che non venga salvato dalle vostre pietose mani.

Così scriveva nel 1698 il falsario William Chaloner – il più abile e pittoresco fuorilegge del suo tempo – al funzionario governativo che era finalmente riuscito a catturarlo, processarlo e condannarlo. Chaloner aveva minacciato l'integrità della valuta inglese, a quel tempo in gran parte costituita di monete d'oro e d'argento.

L'oggetto di questo disperato appello era un certo Isaac Newton, direttore (e ben presto sovrintendente) della Zecca. Newton stava facendo il suo lavoro, che era di vigilare sull'attività della Zecca, controllare le nuove grandi emissioni di monete e salvaguardare la valuta corrente da falsari e «tosatori» (questi ultimi rimettevano in circolazione le monete dopo aver limato via un po' del prezioso metallo). Questa carica, qualcosa di simile a quella di ministro del Tesoro, mescolava l'alta politica degli intrighi parlamentari con la persecuzione di delinquenti, paltonieri, truffatori, ladri e altra gentaglia che saccheggiava la moneta del regno. La Corona aveva ricompensato Newton, il più eminente scienziato del suo tempo, dandogli questo impiego come sinecura, mentre egli attendeva a cose più importanti. Ma Newton prese seriamente il suo lavoro. Inventò la tecnica di scanalare i bordi delle monete per sventare l'opera dei «tosa-

tori». Assisteva di persona all'impiccagione dei falsari. L'incarico era tutt'altra cosa dalla serena maestà della precedente vita di Newton, quando la sua ossessione per la scienza e la matematica aveva prodotto il massimo progresso nella storia della filosofia naturale, un progresso che non sarebbe stato superato, forse, fino alla teoria della relatività, ai primi del Novecento.

Tanto per fare un po' di cronologia, Isaac Newton era nato in Inghilterra lo stesso anno (1642) della morte di Galileo. Non si può parlare di fisica senza parlare di Newton. Egli fu uno scienziato di eccezionale importanza. L'influenza delle sue imprese sulla società umana compete con quella di Gesù, Maometto, Mosè e Gandhi, per non dire di Alessandro il Grande, Napoleone e tutto il loro genere. La legge della gravitazione universale di Newton e la metodologia da lui creata occupano la prima mezza dozzina di capitoli di ogni manuale di fisica; capirli è essenziale per chiunque segua una carriera di ingegnere o scienziato. Si è parlato di Newton come di persona modesta a causa della sua famosa frase «Se ho visto più lontano della maggior parte degli uomini è perché mi sono levato sulle spalle di giganti», che si pensa generalmente riferita a uomini come Copernico, Brahe, Keplero e Galileo. Un'altra interpretazione, tuttavia, è che egli stesse semplicemente punzecchiando il suo principale rivale scientifico e spirito vendicatore, il bassissimo Robert Hooke, che aveva sostenuto, non senza qualche ragione, di aver scoperto per primo la gravità.

Ho contato più di venti biografie di Newton degne di questo nome. E la letteratura che analizza, interpreta, approfondisce e commenta la vita e la scienza di Newton è sterminata. La biografia di Richard Westfall, pubblicata nel 1980, conta dieci dense pagine di fonti. L'ammirazione di Westfall per il suo soggetto è illimitata:

> Ho avuto il privilegio di conoscere, in varie epoche, diversi uomini brillanti, uomini di cui riconosco senza esitazione la superiorità intellettuale. Non ne ho mai incontrato uno, però, con il quale non fossi disposto a misurarmi, così che è sembrato ragionevole dire, di volta in volta, che le mie capacità erano la metà, o un terzo o un quarto delle sue, ma, in ogni caso, sempre una frazione finita. Il risultato finale del mio studio di Newton è servito a convincermi che non vi è alcuna possibilità di misurarsi con lui. Egli si pone su un piano totalmente diverso, là dove sta l'esiguo manipolo di geni eccelsi che hanno forgiato le categorie dell'intelletto umano.

La storia dell'atomismo è una storia di riduzionismo, lo sforzo di ridurre tutte le operazioni della natura a un piccolo numero di leggi che governano un piccolo numero di oggetti primitivi. Il riduzionista di maggior successo fu Isaac Newton. Ci sarebbero voluti altri 250 anni prima che il suo possibile pari sorgesse dalla specie dell'*Homo sapiens* nella città di Ulm, in Germania, nel 1879.

La forza sia con noi

Per avere un'idea di come funziona la scienza, si deve studiare Newton. Nondimeno, la formazione newtoniana degli studenti del primo corso di fisica tradisce troppo spesso la potenza e la portata della sua sintesi. Newton sviluppò una descrizione quantitativa, e pur tuttavia comprensiva, del mondo fisico che si adattava alle descrizioni fattuali del comportamento delle cose. La sua leggendaria connessione della caduta della mela al movimento periodico della Luna esprime tutto lo spaventoso potere del ragionamento matematico. La spiegazione di come la mela cade in terra e la dimostrazione di come la Luna orbita intorno alla Terra fanno parte di un'idea onnicomprensiva. Newton scrisse: «Vorrei che riuscissimo a derivare, mediante lo stesso livello di ragionamento, il resto dei fenomeni naturali da principi meccanici, poiché sono, per molte ragioni, propenso a credere che essi possano dipendere tutti da certe forze».

Ai tempi di Newton, si sapeva già come si muovono gli oggetti: si poteva conoscere la traiettoria di una pietra lanciata, l'oscillazione regolare del pendolo, il moto lungo il piano inclinato, la caduta libera di oggetti disparati, l'equilibrio statico delle strutture, la forma mutevole di una goccia d'acqua. Ciò che ha fatto Newton è stato organizzare questi e molti altri fenomeni in un unico sistema. Egli concluse che qualsiasi cambiamento nel movimento è causato da una forza, e che la reazione di un oggetto alla forza è in rapporto con una proprietà dell'oggetto che egli chiamò «massa». Ogni scolaro sa che Newton formulò tre leggi del moto. La prima legge è una riformulazione della scoperta galileiana che il movimento non richiede nessuna forza. Ciò che ci interessa ora è la seconda legge, che si incentra sulla forza, ma è strettamente intrecciata con uno dei misteri della nostra storia: la massa. Essa enuncia *come* la forza altera il movimento.

Generazioni di manuali hanno affrontato definizioni e questioni di coerenza logica della seconda legge di Newton, che è scritta come segue: $F = ma$. «Effe uguale emme per a», ovvero la *forza* è uguale alla *massa* moltiplicata per l'*accelerazione*. In questa equazione, Newton non definisce né la forza né la massa, e dunque non risulta mai chiaro se essa rappresenti una definizione o una legge fisica. Nondimeno, essa ci serve, in qualche modo, per arrivare alla legge fisica

più utile che sia mai stata intuita. Questa semplice equazione è spaventosamente potente e, nonostante il suo aspetto innocente, può essere tremendamente difficile da risolvere. Brrr! La matematica! Ma non preoccupatevi, per quanto ci riguarda ne parleremo soltanto, senza provarci realmente a farla. Inoltre, questa comoda formula è la chiave dell'universo meccanico, e dunque ci sono dei buoni motivi per soffermarci su di essa. (Tratteremo due formule newtoniane. Per i nostri scopi, chiamiamo questa formula I.)

Che cos'è a? Si tratta esattamente della stessa quantità misurata da Galileo a Pisa e a Padova. Può essere l'accelerazione di qualsiasi oggetto, di una pietra come di un pendolo, di un missile di minacciosa e vertiginosa bellezza come del veicolo spaziale *Apollo*. Se non poniamo limiti al dominio della nostra equazioncina, allora a rappresenta il moto di pianeti, stelle o elettroni. L'accelerazione è la variazione di una velocità. Il nome che si dà al pedale dell'acceleratore della vostra macchina è perfettamente adeguato. Se andate da 10 a 40 chilometri all'ora in 5 minuti, avete ottenuto un certo valore di a. Se andate da 0 a 60 chilometri in 10 secondi, avete raggiunto un'accelerazione molto maggiore.

Che cos'è m? Parlando con franchezza, è una proprietà della materia. Essa è misurata dalla reazione di un oggetto a una forza. Maggiore è m, minore è la reazione (a) alla forza imposta. Questa proprietà è chiamata spesso inerzia e il nome completo che si dà a m è «massa inerziale». Galileo invocò l'inerzia per spiegare come mai un corpo in movimento «tende a conservare quel movimento». Possiamo senz'altro usare l'equazione per distinguere fra masse differenti. Applichiamo la stessa forza – diremo più avanti di che forza si tratti – a una serie di oggetti e usiamo un cronometro e un regolo per misurare il movimento risultante, la quantità a. Oggetti che hanno differenti m avranno differenti a. Facciamo una lunga serie di questi esperimenti confrontando i valori di m in un grande numero di oggetti. Una volta fatto ciò, possiamo costruire arbitrariamente un oggetto standard, fabbricato ad arte in qualche metallo inalterabile. Imprimete su questo oggetto la scritta «1,000 kg» (questa è la nostra unità di massa) e (con l'aiuto della pace mondiale) collocatelo in una camera di sicurezza nell'Ufficio dei campioni dei pesi e delle misure delle maggiori capitali del mondo. Adesso abbiamo un modo per attribuire un valore, un numero m, a ogni oggetto. Tale valore è semplicemente un multiplo o una frazione del nostro «un chilogrammo» standard.

Detto questo della massa, che cos'è F? La forza. Che cos'è la forza? Newton la definì la «spinta esercitata da un corpo su un altro», l'agente causale del mutamento del movimento. Il nostro ragionamento non è un po' circolare? Probabilmente lo è, ma non c'è da preoccuparsi; possiamo usare la legge per confrontare forze che agiscono su un corpo standard. Adesso viene il bello. Le forze ci sono date da una natura generosa. Newton fornisce l'equazione. La natura fornisce la forza. Tenete bene a mente che l'equazione vale per qualsiasi forza. Al momento, conosciamo quattro forze in natura. Ai tempi di Newton, gli scienziati stavano appena cominciando a conoscerne una, la gravità. La gravità causa la caduta degli oggetti, lo slancio dei proiettili e l'oscillazione del pendolo. La Terra stessa, attraendo tutti gli oggetti sulla (o in prossimità della) sua superficie, genera la forza che spiega la grande varietà di possibili movimenti e perfino l'assenza di movimento.

Fra l'altro, possiamo usare $F = ma$ per spiegare la struttura degli oggetti immobili, come il lettore seduto nella sua poltrona o, esempio più istruttivo, in piedi sulla scala della sua mansarda. La Terra attrae il lettore con una certa forza. La poltrona, o la scala, lo respinge con una forza uguale e contraria. La somma delle due forze che agiscono sul lettore è zero e non c'è movimento. (Tutto ciò accade dopo che egli è uscito a comprare questo libro.) La scala della mansarda ci dice quanto costa cancellare l'attrazione della gravità: 60 chilogrammi o, nelle nazioni culturalmente meno progredite, non ancora entrate nel sistema metrico decimale, 132 libbre. «Oddio, la dieta comincia domani.» Questa è la forza di gravità che agisce sul lettore. Questo è ciò che chiamiamo «peso», nient'altro che l'attrazione gravitazionale. Newton sapeva che il vostro peso è soggetto a variazioni, lievissime se vi trovate in una profonda vallata o su un'alta montagna, molto consistenti se vi trovate sulla Luna. Ma la massa, ciò che in voi resiste a una forza, rimane la stessa.

Newton non sapeva che le attrazioni e repulsioni di pavimenti, poltrone, corde, molle, acqua e vento sono fondamentalmente elettriche. Non gli importava. L'origine della forza era irrilevante per la validità della sua famosa equazione. Egli era in grado di analizzare molle, mazze da cricket, strutture meccaniche, la forma di una goccia d'acqua o dello stesso nostro pianeta. Data la forza, possiamo calcolare il movimento. Se la forza è zero, la *variazione* della velocità è zero; vale a dire, il corpo continua nel suo movimento a velocità costante. Se lanciate in alto una palla, la sua velocità diminuisce finché, all'apice della sua traiettoria, essa si ferma e poi scende con velocità crescente. È la forza di gravità a far sì che ciò accada, in quanto è orientata verso il basso. Lanciate una palla nella parte più

lontana del campo di baseball. Come spieghiamo l'aggraziato arco? Scomponiamo il movimento in due parti: una parte su/giù e una parte orizzontale (indicata dall'ombra della palla sul terreno).

La parte orizzontale non ha forza (come Galileo, dobbiamo trascurare la resistenza dell'aria, che rappresenta un piccolo fattore di disturbo). Così, il movimento orizzontale è a velocità costante. Verticalmente, abbiamo l'ascesa e la discesa nel guanto del giocatore che arresta la palla. E il moto composto? Una parabola. Evviva! Qui c'è ancora di mezzo Lei, l'Onnipotente, che dimostra la Sua padronanza della geometria.

Supponendo di conoscere la massa della palla, e di essere in grado di misurarne l'accelerazione, si può calcolare il suo preciso movimento mediante $F = ma$. La sua traiettoria è determinata: essa descriverà una parabola. Ma ci sono molte specie di parabole. Una palla battuta debolmente raggiunge a stento il lanciatore; un colpo potente costringe il giocatore al centro a correre indietro. Qual è la differenza? Newton chiamava queste variabili le condizioni di partenza o iniziali. Qual è la velocità iniziale? Qual è la direzione iniziale? Essa può variare da perpendicolare (in questo caso il battitore prende un bel colpo in testa) a quasi orizzontale, nel qual caso la palla ricade rapidamente al suolo. In tutti i casi, la traiettoria è determinata dalla velocità e dalla direzione all'inizio del movimento, vale a dire dalle condizioni iniziali.

ASPETTATE!!!

Adesso viene un punto filosoficamente profondo. Dato un insieme di condizioni iniziali per un certo numero di oggetti, e data la conoscenza delle forze che agiscono su questi oggetti, è possibile prevedere i loro movimenti... per sempre. Nella concezione del mondo di Newton, tutto è determinato e prevedibile. Per esempio, supponiamo che tutto ciò che esiste nel mondo sia fatto di atomi, un'idea bizzarra da tirar fuori a pagina 98 di questo libro. Supponiamo di conoscere il movimento iniziale e la forza di ciascuno dei miliardi e miliardi di atomi. Supponiamo che una «madre di tutti i computer» cosmica sia in grado di calcolare la posizione futura di tutti questi atomi. Dove si troveranno in qualche istante futuro, per esempio nel giorno delle elezioni? Il risultato sarebbe prevedibile. Fra questi miliardi e miliardi di atomi ve ne sarebbe un piccolo sottoinsieme chiamato «lettore» o «Leon Lederman» o «il papa». Previsto, determinato... e così il libero arbitrio diventa una mera illusione creata da una mente per i propri interessi. La scienza newtoniana era apparentemente deterministica. Il ruolo dell'Onnipotente fu ridotto dai filosofi postnewtoniani a caricare la molla del mondo e a metterlo in funzione. Di qui in poi, l'universo poteva funzionare benissimo senza di Lei. (I begli spiriti che si occupano di questi problemi negli anni Novanta avrebbero qualcosa da obiettare.)

L'impatto di Newton sulla filosofia e sulla religione fu altrettanto profondo della sua influenza sulla fisica. Tutto per quell'equazione chiave $\vec{F} = m\vec{a}$. Le frecce ricordano allo studente le forze e il loro conseguente punto di accelerazione in qualche direzione. Parecchie quantità – per esempio massa, temperatura, volume – non hanno una direzione nello spazio. Ma i «vettori», quantità come forza, velocità e accelerazione, sono tutti provvisti di freccette.

Prima di lasciare «effe uguale emme per a», soffermiamoci un po' sul potere di questa formula. Essa è la base della nostra ingegneria, meccanica, civile, idraulica, acustica e di altre sue branche; è usata per render conto della tensione di superficie, del movimento dei fluidi nei tubi, dell'azione capillare, della deriva dei continenti, della propagazione del suono nell'aria e nell'acciaio, della stabilità di strutture come la Sears Tower o di uno dei più bei ponti del mondo, il Bronx-Whitestone Bridge, che si inarca graziosamente sulle acque della Pelham Bay. Da ragazzo, lanciavo la bicicletta dalla mia casa in Manor Avenue alle rive della Pelham Bay, dove contemplavo la costruzione di questa leggiadra struttura. Gli ingegneri che progettarono il ponte avevano un'intima conoscenza dell'equazione di Newton; adesso, via via che i nostri computer sono diventati sempre più veloci, la nostra capacità di risolvere problemi usando $F = ma$ va progressivamente aumentando. Bravo Isaac Newton!

Avevo promesso tre leggi e ho parlato soltanto di due. La terza legge è formulata come «l'azione è uguale alla reazione». Più precisamente, essa asserisce che ogniqualvolta un oggetto A esercita una forza su un oggetto B, B esercita una forza uguale e contraria su A. Il potere di questa legge sta nel fatto di esprimere una caratteristica di tutte le forze – gravitazionale, elettrica, magnetica, e così via – indipendentemente da come sono generate.

La F preferita di Isaac

La successiva, più profonda scoperta di Isaac Newton ebbe a che fare con la forza più specifica che egli trovò in natura: la $\vec{F}$ della gravità. Si ricordi che la F nella seconda legge di Newton significa solo

forza, qualsiasi forza. Quando si sceglie una forza da inserire nell'equazione, si deve prima definire, quantificare tale forza in modo da far funzionare l'equazione. Ciò vuol dire, Dio ci aiuti, un'altra equazione.

Newton scrisse un'espressione per *F*(gravità) – cioè per quando la forza rilevante è la gravità – chiamata legge universale della gravitazione. L'idea è che tutti gli oggetti esercitino forze gravitazionali l'uno sull'altro. Queste forze dipendono dalle distanze fra gli oggetti e dalla quantità di materia che essi possiedono. Materia? Un momento. Qui interviene la parzialità di Newton per la natura atomica della materia. Egli pensava che la forza di gravità agisse su tutti gli atomi dell'oggetto e non solo, per esempio, su quelli in superficie. La forza è esercitata dalla Terra sulla mela come un tutto. Ogni atomo della Terra attrae ogni atomo della mela. E, dobbiamo aggiungere, anche la mela esercita una forza sulla Terra; vi è qui una tremenda simmetria, poiché il nostro pianeta deve avvicinarsi di una quantità infinitesimale per incontrare la mela che cade. L'attributo «universale» della legge è giustificato dal fatto che questa forza è dappertutto. È anche la forza esercitata dalla Terra sulla Luna, o dal Sole su Marte, o dal Sole su Proxima Centauri, la stella più vicina, a una distanza di quarantamila miliardi di chilometri. In breve, la legge di gravità di Newton si applica a tutti gli oggetti in qualsiasi luogo. La forza si espande, diminuendo in relazione al valore che quantifica il grado di separazione fra gli oggetti. Gli studenti imparano che questa è la «legge dell'inverso del quadrato», il che significa che la forza diminuisce in ragione del quadrato della distanza. Se la distanza fra due oggetti raddoppia, la forza si riduce a un quarto di quel che era; se la distanza triplica, la forza si riduce a un nono, e così via.

Che cosa esercita la repulsione?

Come ho detto prima, la forza è dotata anche di una direzione: la gravità, per esempio, è orientata «all'ingiù», verso la superficie della Terra. Qual è la natura della controforza, la forza orientata «all'insù», l'azione della poltrona sul posteriore di chi ci sta seduto, l'impatto di una mazza di legno su una palla da baseball, o di un martello sul chiodo, la spinta del gas elio che gonfia un palloncino, la «pressione» esercitata dall'acqua su un pezzo di legno immerso a forza sotto la sua superficie, il *boing* che vi trattiene quando vi sdraiate su un materasso a molle, la deprimente incapacità della maggior parte di noi di camminare su un muretto? La sorprendente, quasi sconvolgente risposta è che tutte queste forze «all'insù» sono differenti manifestazioni della forza elettrica.

L'idea, sulle prime, può apparire aliena al nostro mondo. Dopotutto, non sentiamo cariche elettriche che ci spingono in alto quando stiamo in piedi su una scala o sdraiati sul divano. La forza è indiretta. Come abbiamo appreso da Democrito (e da esperimenti fatti nel XX secolo), la maggior parte della materia è spazio vuoto e tutto è fatto di atomi. Ciò che tiene uniti gli atomi e spiega la rigidità della materia è la forza elettrica. (Anche la resistenza dei solidi alla penetrazione ha a che fare con la teoria quantistica.) Questa forza è potentissima. In una scaletta di metallo ce n'è abbastanza da compensare l'attrazione gravitazionale dell'intera Terra. D'altra parte, non riuscireste a stare in piedi nel bel mezzo di un lago o a camminare fuori dal vostro balcone al decimo piano. Nell'acqua, e soprattutto nell'aria, gli atomi sono troppo distanti per offrire il tipo di rigidità che compenserà il vostro peso.

Paragonata alla forza elettrica che tiene insieme la materia e le conferisce la sua rigidità, la forza gravitazionale è estremamente debole. Quanto debole? Durante le mie lezioni di fisica faccio il seguente esperimento. Prendo un listello di legno, diciamo di cinque centimetri per dieci e della lunghezza di trenta centimetri, e traccio una riga nel mezzo. Lo blocco verticalmente e contrassegno la metà superiore con «alto» e la metà inferiore con «basso». Tenendo fermo l'alto, chiedo: «Perché il basso resta fermo quando l'intera Terra lo attrae in giù?». Risposta: «È saldamente attaccato all'alto dalle forze elettriche coesive degli atomi del legno. Lederman sta tenendo fermo l'alto». Giusto.

Per valutare quanto la forza elettrica dell'attrazione esercitata dall'alto sul basso sia maggiore della forza gravitazionale (l'attrazione esercitata dalla Terra sul basso), uso una sega per tagliare il legno a metà lungo la linea divisoria. (Ho sempre desiderato essere un maestro artigiano.) A questo punto ho ridotto praticamente a zero con la mia sega le forze elettriche esercitate dall'alto sul basso. Ora, in procinto di cadere sul pavimento, il basso del listello viene contrastato. L'alto, essendo il suo potenziale elettrico vanificato dalla sega, sta ancora attraendo il basso con la sua forza di gravità. La Terra a sua volta sta attraendo il basso per effetto della gravità. Indovinate chi vince. La metà bassa del listello cade sul pavimento.

Usando l'equazione valida per la legge di gravità, possiamo calcolare la differenza fra le due forze gravitazionali. Ne risulta che la

gravità esercitata dalla Terra sul basso ha il sopravvento, risultando un miliardo di volte più forte della gravità esercitata dall'alto sul basso. (Fidatevi di me su questo punto.) Conclusione: la forza elettrica dell'alto sul basso prima che la sega li separasse era *almeno* un miliardo di volte maggiore della forza gravitazionale dell'alto sul basso. Questo è il massimo che si può fare in un'aula. Il numero reale è 10^{41}, ovvero un uno seguito da quarantuno zeri! Scriviamolo per intero:

100.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000

Il numero 10^{41} è al di là di qualsiasi valutazione, ma questo forse ci sarà d'aiuto. Consideriamo un elettrone e un positrone alla distanza di due decimi di millimetro l'uno dall'altro. Calcoliamo la loro attrazione gravitazionale. Calcolate ora a che distanza dovrebbero essere per ridurre la loro forza elettrica al valore della loro attrazione gravitazionale. La risposta è: alcune migliaia di trilioni di chilometri (cinquanta anni luce). Ciò presuppone che la forza elettrica diminuisca in ragione del quadrato della distanza, esattamente come la forza gravitazionale. Ci serve questo? La gravità domina i molti moti che Galileo ha studiato per primo, poiché ogni parte del pianeta Terra attrae le cose in prossimità della sua superficie. Nello studio degli atomi e degli oggetti più piccoli, l'effetto gravitazionale è troppo lieve per poter essere avvertito. In molti altri fenomeni, la gravità diventa irrilevante. Per esempio, nella collisione di due palle da biliardo (i fisici privilegiano le collisioni come strumento di comprensione), l'influenza della Terra è eliminata effettuando l'esperimento su un tavolo. L'attrazione verticale verso il basso della gravità è compensata dalla spinta verso l'alto del tavolo. Ciò che resta sono le forze orizzontali che entrano in gioco quando le palle collidono.

Il mistero delle due masse

La legge della gravitazione universale di Newton forniva la F in tutti i casi in cui la forza rilevante è la gravità. Ho già avuto modo di dire che egli scrisse la sua F in modo che la forza di qualsiasi oggetto, per esempio la Terra, o di qualsiasi altro oggetto, per esempio la Luna, dipendesse dalla «materia gravitazionale» della Terra moltiplicata per quella della Luna. Per quantificare questa profonda verità, Newton escogitò un'altra formula, alla quale abbiamo già implicitamente alluso. In parole, la forza della gravità esercitata fra due

oggetti qualsiasi, diciamo A e B, è uguale a una costante numerica (solitamente denotata dal simbolo G) moltiplicata per la «materia gravitazionale» di A (che indichiamo con M_A) moltiplicata per quel-

$$F = G\frac{M_A \times M_B}{R^2}$$

la di B (M_B), il tutto diviso per il quadrato della distanza fra l'oggetto A e l'oggetto B. In simboli:

Chiameremo questa formula II. Anche chi ha meno confidenza con i numeri riconoscerà l'economia della nostra formula. Per concretezza, potete pensare che A e B siano, rispettivamente, la Terra e la Luna, anche se nella potente sintesi newtoniana la formula si ap-

$$F = G\frac{M_{Terra} \times M_{Luna}}{R^2}$$

plica a tutti i corpi. Un'equazione specifica per questo sistema a due corpi potrebbe essere:

La distanza Terra-Luna, R, è all'incirca di 400.000 chilometri. La costante G, se volete saperlo, è $6{,}67 \times 10^{-11}$ in unità che misurano i valori M in chilogrammi e R in metri. Questa costante, conosciuta con precisione, misura l'intensità della forza gravitazionale. Non c'è bisogno che memorizziate questo numero e neppure che ve ne preoccupiate. Limitatevi a notare che 10^{-11} significa che è molto piccolo. F diventa realmente significativa solo quando almeno una delle M è enorme, come tutto il «contenuto» materiale della Terra. Se un Creatore vendicativo rendesse G uguale a zero, la vita finirebbe d'un colpo. La Terra devierebbe tangenzialmente alla sua orbita ellittica intorno al Sole e il riscaldamento del globo sarebbe drammaticamente sconvolto.

La cosa eccitante è M, che chiamiamo «massa gravitazionale». Ho già detto che essa misura la quantità di materia nella Terra e nella Luna, la materia che, grazie alla nostra formula, crea la forza di gravità. «Aspetti un momento» sento gemere qualcuno nell'ultima fila. «Adesso ci sono due masse. C'è la massa (m) in $F = ma$ (formula I) e la massa (M) nella nostra nuova formula II. Di quale delle due sta parlando?» Molto acuto. Questa, più che un disastro, è una sfida.

Chiamiamo questi due differenti tipi di massa M grande e m piccola. M grande è la «materia gravitazionale» di un oggetto che *attrae un altro oggetto*; m piccola è la massa inerziale, il «contenuto» materiale di un oggetto che *fa resistenza a una forza* e determina il movimento risul-

tante. Si tratta di due differenti attributi della materia. È stata un'intuizione di Newton a capire che gli esperimenti effettuati da Galileo (ricordate Pisa!) e da molti altri suggerivano con forza $M = m$. La «materia gravitazionale» è esattamente uguale alla massa inerziale che appare nella seconda legge di Newton.

L'uomo con due dieresi

Newton non capì perché le due quantità sono uguali; si limitò ad accettarlo. Fece perfino alcuni ingegnosi esperimenti per studiare tale uguaglianza. Questi esperimenti mostrarono che c'è uguaglianza circa all'1%. Vale a dire $M/m = 1{,}00$; M divisa per m ha come risultato 1 con due cifre decimali. Più di duecento anni dopo, questo numero venne spettacolarmente migliorato. Fra il 1888 e il 1922, un nobile ungherese, il barone Roland Eötvös, in una serie incredibilmente ingegnosa di esperimenti effettuati con pendoli di alluminio, rame, legno e diversi altri materiali, dimostrò che la coincidenza di queste due diverse proprietà della materia era precisa nell'ordine di più di cinque parti su un miliardo. In termini matematici, questo significa: $M(\text{gravità})/m(\text{inerzia}) = 1 \pm 0{,}000000005$. Essa cade, cioè, fra 0,999999995 e 1,000000005.

Oggigiorno, abbiamo confermato questo rapporto a più di dodici zeri dopo la virgola. Galileo aveva dimostrato a Pisa che due sfere diverse cadono alla stessa velocità. Newton ne mostrò il perché. Poichè M grande è uguale a m piccola, la forza di gravità è proporzionale alla massa dell'oggetto. La massa gravitazionale (M) di una palla di cannone potrebbe essere mille volte più grande di quella di un cuscinetto a sfera. Ciò significa che la forza gravitazionale agente su di essa sarà mille volte maggiore. Ma significa anche che la sua massa inerziale (m) opporrà una resistenza mille volte maggiore rispetto alla forza della massa inerziale del cuscinetto a sfera. Se i due oggetti vengono lasciati cadere dalla torre, i due effetti si annullano. La palla di cannone e il cuscinetto a sfera colpiscono il suolo nello stesso istante.

L'uguaglianza di M e m era una coincidenza incredibile e tormentò gli scienziati per secoli. Fu l'equivalente classico del 137. Nel 1915, Einstein incorporò questa «coincidenza» in una profonda teoria, nota come teoria della relatività generale.

Le ricerche del barone Eötvös su M e m furono la sua più considerevole impresa scientifica, ma non certamente il suo più importante contributo alla scienza. Fra l'altro, egli fu un pioniere della punteggiatura. Due dieresi! Ciò che più importa, Eötvös finì per occuparsi di educazione scientifica e formazione degli insegnanti di scuola superiore, un argomento che è molto vicino e caro ai miei interessi. Gli storici hanno osservato che gli sforzi educativi del barone Eötvös portarono a un'esplosione di geni: luminari come i fisici Edward Teller, Eugene Wigner, Leo Szilard e il matematico John von Neumann provennero tutti da Budapest durante l'era di Eötvös. La produzione di scienziati e matematici ungheresi nei primi anni del XX secolo fu così prolifica che molti, peraltro pacati, osservatori credettero che Budapest rientrasse in un piano ordito dai marziani per infiltrarsi e impadronirsi del pianeta.

L'opera di Newton e di Eötvös è spettacolarmente illustrata dal volo spaziale. Noi tutti abbiamo visto alla televisione una capsula spaziale: l'astronauta lascia andare la penna, che si libra accanto a lui in una divertente dimostrazione dell'«assenza di peso». Naturalmente, l'uomo e la penna non sono realmente senza peso. La forza di gravità è ancora operante. La Terra esercita un'attrazione sulla massa gravitazionale di capsula, astronauta e penna. Nel frattempo, il movimento in orbita è determinato dalle masse inerziali, date dalla formula I. Poiché le due masse sono uguali, il movimento è lo stesso per tutti gli oggetti. Astronauti, penna e capsula si muovono insieme come danzando nell'assenza di peso.

Un altro approccio consiste nel concepire astronauta e penna in caduta libera. Mentre la capsula orbita *intorno* alla Terra, essa in verità sta cadendo *verso* la Terra. Questo è ciò che significa orbitare. La Luna, in un certo senso, sta cadendo verso la Terra; essa non la raggiunge mai solo perché la superficie della sfera terrestre cade via alla stessa velocità. Così, se tanto il nostro astronauta quanto la sua penna sono in caduta libera, si trovano nella stessa posizione dei due pesi lasciati cadere dalla torre di Pisa. Nella capsula o in caduta libera, se l'astronauta potesse stare in piedi su una scala, peserebbe zero. Da cui il termine «assenza di peso». In effetti, la NASA usa la tecnica della caduta libera per addestrare gli astronauti. Nelle simulazioni di assenza di peso, gli astronauti sono trasportati a elevate altitudini in un jet che effettua una serie di circa quaranta parabole (ancora questa forma). Nella fase in picchiata della parabola, gli astronauti sperimentano la caduta libera... l'assenza di peso. (Non senza qualche inconveniente, però. Il piano di addestramento è conosciuto informalmente come «cometa del vomito».)

Roba da era spaziale. Ma Newton sapeva tutto sull'astronauta e la

sua penna. Già nel XVII secolo, avrebbe potuto dirvi che cosa sarebbe accaduto sulla navicella spaziale.

Il grande sintetizzatore

Newton condusse una vita da semirecluso a Cambridge, con frequenti visite alla tenuta di famiglia nel Lincolnshire, in un'epoca in cui la maggior parte delle altre grandi menti scientifiche dell'Inghilterra risiedevano a Londra. Dal 1684 al 1687 egli lavorò assiduamente a quella che doveva diventare la sua opera principale, i *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Quest'opera sintetizza tutti i precedenti studi di Newton nel campo della matematica e della meccanica, molti dei quali erano rimasti incompleti, provvisori, ambivalenti. I *Principia* erano una sinfonia compiuta, che abbracciava tutti i suoi ultimi vent'anni di sforzi.

Per scrivere i *Principia* Newton dovette ricalcolare, ripensare, rivedere e collezionare nuovi dati, sul passaggio delle comete, sulle lune di Giove e di Saturno, sulle maree nell'estuario del Tamigi, e via dicendo. È qui che egli cominciò a insistere sullo spazio e il tempo assoluti, ed è qui che espresse rigorosamente le sue tre leggi del moto. Qui egli sviluppò il concetto di massa intesa come la quantità di materia in un corpo: «La quantità di materia è quella che ha origine congiuntamente dalla sua densità e dalla sua grandezza».

Questo parossismo di feconda creatività ebbe i suoi effetti collaterali. Secondo la testimonianza di un assistente che viveva al suo fianco, Newton era

> così assorbito, così coinvolto nei suoi studi che mangiava in maniera frugalissima; non solo, a volte dimenticava del tutto di mangiare [...]. Quando, raramente, decideva di pranzare nel refettorio, finiva per [...] uscir fuori in strada, si fermava, si rendeva conto di un errore, tornava indietro frettolosamente e, anziché entrare nel refettorio, tornava nei suoi appartamenti [...]. All'occasione, cominciava a scrivere stando in piedi davanti alla scrivania, senza neppure concedersi la comodità di una seggiola.

Tale è l'ossessione dello scienziato creativo.

I *Principia* colpirono l'Inghilterra, e in realtà l'Europa intera, come una bomba. Gli echi della pubblicazione si sparsero rapidamente, anche prima che l'opera uscisse dalla stamperia. Newton godeva già di una grande reputazione tra i fisici e i matematici. I *Principia* lo proiettarono nella leggenda e lo imposero all'attenzione di filosofi come John Locke e Voltaire. Fu un grandissimo successo. Discepoli, seguaci, e anche critici della statura di Christiaan Huygens e Gottfried Leibniz, si

unirono nelle lodi dell'immane portata e profondità dell'opera. L'arcirivale di Newton, Robert «Piccoletto» Hooke, fece ai *Principia* il complimento definitivo, affermando di essere stato plagiato dall'autore.

Durante la mia ultima visita all'Università di Cambridge, ho chiesto di vedere una copia dei *Principia*, aspettandomi di trovarla immersa in un'atmosfera di elio in una bacheca di vetro. No, si trovava, la prima edizione, sugli scaffali della biblioteca di fisica. Questo è un libro che ha cambiato la scienza.

Da dove Newton trasse la propria ispirazione? Ancora una volta, c'era un'abbondante letteratura sul moto planetario, che comprendeva alcune opere molto suggestive di Hooke. Queste fonti ebbero probabilmente altrettanta influenza della capacità intuitiva suggerita dal logoro aneddoto della mela. Come narra la storia, Newton vide cadere una mela in un pomeriggio inoltrato, con una luna appena accennata in cielo. Questo fu il suo anello mancante. La Terra esercita la sua attrazione gravitazionale sulla mela, un oggetto terrestre, ma la forza prosegue e può raggiungere la Luna, un oggetto celeste. La forza causa la caduta al suolo della mela. Causa il movimento circolare della Luna intorno alla Terra. Newton completò le sue equazioni, e tutto acquistò un senso. Verso la metà degli anni Ottanta, egli aveva combinato la meccanica celeste con la meccanica terrestre. La legge universale della gravitazione spiegava la complessa danza del sistema solare, le maree, la concentrazione delle stelle in galassie, la concentrazione delle galassie in ammassi, le rare ma prevedibili visite della cometa di Halley e altre cose ancora. Nel 1969, la NASA mandò tre uomini sulla Luna con un razzo. Il loro equipaggiamento richiese tutta la tecnologia dell'era spaziale, ma le equazioni chiave programmate nei computer della NASA per tracciare la traiettoria dalla Terra alla Luna e ritorno erano vecchie di tre secoli. Tutte opera di Newton.

Il guaio della gravità

Abbiamo visto che su scala atomica, per esempio nel caso della forza esercitata da un elettrone su un protone, la forza gravitazionale è così piccola che abbiamo bisogno di un 1 seguito da quarantuno zeri per esprimerla. Questo significa veramente essere... *debole*! Su scala macroscopica, la legge dell'inverso del quadrato è verificata dalla dinamica del nostro sistema solare. Può essere controllata in laboratorio solo con grande difficoltà, usando una sensibile bilancia di torsione. Ma il guaio della gravità, negli anni Novanta del nostro

secolo, è che essa, sola tra le quattro forze conosciute, non obbedisce alla teoria dei quanti. Come si è già avuto modo di dire, abbiamo identificato delle particelle «portatrici di forza» associate con la forza debole, forte ed elettromagnetica. Ma ci sfugge ancora una particella associata alla gravità. Abbiamo dato un nome all'ipotetica particella responsabile della forza di gravità – gravitone – ma non l'abbiamo ancora scoperta. Sono stati costruiti grandi e sensibili strumenti per scoprire le onde gravitazionali che avrebbero origine da qualche evento astronomico catastrofico, per esempio una supernova o un buco nero che divora una sfortunata stella, o l'improbabile collisione di due stelle di neutroni. Nessun evento del genere è stato finora scoperto. La ricerca, comunque, va avanti.

La gravità è il nostro problema numero uno quando cerchiamo di combinare la fisica delle particelle con la cosmologia. Qui siamo alla pari dei Greci antichi: aspettiamo di veder accadere qualcosa, incapaci di fare esperimenti. Se potessimo far cozzare due stelle, invece di due protoni, allora avremmo modo di vedere qualche effetto reale. Se i cosmologi hanno ragione e il Big Bang è veramente una buona teoria – e, come mi è stato recentemente assicurato a un congresso, è ancora una buona teoria – allora, in una fase iniziale, tutte le particelle dell'universo si trovavano in una zona limitatissima. L'energia per particella diventò *enorme*. La forza gravitazionale, intensificata da tutta quell'energia, che è equivalente alla massa, diventò una forza rispettabile nel dominio dell'atomo. L'atomo è governato dalla teoria dei quanti. Se non riusciremo a introdurre la forza gravitazionale nella famiglia delle forze quantistiche, non comprenderemo mai i dettagli del Big Bang, e quindi la struttura profonda delle particelle elementari.

Isaac e i suoi atomi

La maggior parte degli studiosi di Newton è d'accordo nel ritenere che egli credesse in una struttura particellare della materia. La gravità fu la sola forza che Newton trattò matematicamente. Egli ipotizzò che la forza che si esercita fra i corpi, si tratti della Terra e della Luna o della Terra e di una mela, deve essere conseguenza della forza che si esercita fra particelle costitutive. Azzarderei l'ipotesi che l'invenzione newtoniana dell'analisi non sia disgiunta dalla sua credenza negli atomi. Per esempio, per capire la forza Terra-Luna si deve applicare la nostra formula II. Ma che cosa usare per R, la distanza? Se la Terra e la Luna fossero piccolissime, non ci sarebbe alcun problema a determinare R. Si tratterebbe della distanza fra i centri dei due oggetti. Tuttavia, sapere in che modo la forza di una piccolissima particella di Terra influenzi la Luna e sommare tutte le forze di tutte le particelle richiede l'invenzione del calcolo integrale, che è un modo per sommare un numero infinito di infinitesimi. In effetti, Newton inventò l'analisi intorno a quel fatidico anno, il 1666, in cui, come egli stesso ebbe a dire, la sua mente «si svegliò notevolmente all'invenzione».

Nel XVII secolo, c'era una preziosa, esigua evidenza in favore dell'atomismo. Nei *Principia*, Newton disse che dobbiamo estrapolare dalle esperienze sensibili per capire le operazioni delle particelle microscopiche che costituiscono i corpi: «Poiché la durezza del tutto ha origine dalla durezza delle parti, noi... inferiamo correttamente la durezza delle particelle indivise, non solo dei corpi che cadono sotto i nostri sensi, ma anche di tutti gli altri».

Le sue ricerche di ottica lo portarono, come Galileo, a interpretare la luce come un flusso di corpuscoli. Alla fine del suo libro, l'*Ottica*, egli passa in rassegna le idee correnti sulla luce e fa queste sbalorditive affermazioni:

> Le parti più piccole dei corpi non hanno certe potenze, virtù o forze per effetto delle quali agiscono a distanza, non solo sui raggi di luce per rifletterli, rifrangerli e fletterli, ma anche le une sulle altre, al fine di produrre una gran parte dei fenomeni della natura? È infatti ben noto che i corpi agiscono l'uno sull'altro per effetto delle attrazioni di gravità, del magnetismo e dell'elettricità; e questi esempi mostrano l'ordine e il corso della natura, *e rendono non improbabile che ci possano essere altri poteri attrattivi oltre a questi* [...] *altri che si estendono a distanze talmente piccole da essere sfuggite, fino a ora, all'osservazione; e forse l'attrazione elettrica può estendersi a tali piccole distanze anche senza essere eccitata per frizione* [corsivo mio].*

Qui abbiamo precognizione, intuizione e addirittura, se si vuole, tracce della grande unificazione che rappresenta il santo Graal dei fisici negli anni Novanta del nostro secolo. Newton non sta forse invocando la ricerca di forze interne all'atomo, conosciute oggi come la forza forte e la forza debole? Forze che, a differenza della gravità, agiscono solo a «distanze piccole»? Egli prosegue scrivendo:

> Considerate tutte queste cose mi sembra probabile che Dio al principio del mondo abbia formato la materia di particelle solide, compatte, dure, impermeabili e mobili [...] e queste particelle originarie, essendo solide, sono [...] tanto perfettamente dure da non poter mai consumarsi o infrangersi:

* I. Newton, *Scritti di ottica*, a cura di A. Pala, Torino, UTET, 1978, pp. 581-582.
** *Ibid.*, p. 600.

nessuna forza comune essendo in grado di dividere ciò che Dio, al momento della creazione, ha fatto uno.**

L'evidenza era debole, ma Newton aprì ai fisici una via che avanza inesorabilmente verso il microcosmo dei quark e dei leptoni. La ricerca di una forza straordinaria che divide «ciò che Dio ha fatto uno» è oggi la frontiera attiva della fisica delle particelle.

La materia spettrale

Nella seconda edizione dell'*Ottica*, Newton completò le sue conclusioni con una serie di *Questioni*. Esse sono così acute – e così generali – che vi si può trovare tutto quello che si vuole. Ma non è così assurdo pensare che Newton possa aver anticipato, in qualche senso profondamente intuitivo, la riflessione sul dualismo onda-particella della teoria dei quanti. Una delle più moleste ramificazioni della teoria newtoniana è il problema dell'azione a distanza. La Terra attrae una mela: questa cade al suolo. Il Sole attrae i pianeti: essi si muovono in orbite ellittiche. Come? Come possono due corpi, con nient'altro che spazio fra di loro, trasmettersi reciprocamente una forza? Un modello in voga all'epoca ipotizzava un etere, un mezzo invisibile e incorporeo che pervadeva tutto lo spazio, attraverso il quale un oggetto A poteva entrare in contatto con un oggetto B.

Come vedremo, l'idea dell'etere fu utilizzata da James Clerk Maxwell per trasportare le sue onde elettromagnetiche. Essa venne demolita da Einstein nel 1905. Ma, come quelli di Pauline, i pericoli dell'etere vanno e vengono, e oggi riteniamo che qualche nuova versione dell'etere (il vero vuoto di Democrito e Anassimandro) sia il luogo dove si nasconde la particella di Dio.

Newton finì per respingere l'idea dell'etere. La sua concezione atomistica avrebbe richiesto un etere particolare, che egli trovava problematico. L'etere dovrebbe trasmettere forze senza impedire, per esempio, il moto dei pianeti nelle loro orbite inviolate.

L'atteggiamento di Newton è illustrato da questo passo dei *Principia*:

> [C'è una] causa senza la quale le forze motrici non sono propagate in cerchio negli spazi; sia che quella causa consista in un corpo centrale qualunque (come è la calamita al centro della forza magnetica [...]), sia in qualche altra cosa che non appare. Questo è un concetto soltanto matematico. Infatti non considero le cause e le sedi fisiche delle forze.*

* I. Newton, *Principi matematici della filosofia naturale*, a cura di A. Pala, Torino, UTET, 1965, p. 99.

A questo punto, il pubblico, se si trattasse di fisici a un moderno seminario, si alzerebbe in piedi e applaudirebbe perché Newton tocca il tema molto moderno che la verifica di una teoria è data dal suo accordo con l'osservazione e l'esperimento. Che dire, dunque, se Newton (e i suoi attuali ammiratori) non conoscevano il *perché della gravità*? Che cosa crea la gravità? Si tratta di una questione filosofica, finché qualcuno non mostrerà che la gravità è conseguenza di un concetto più profondo, forse di qualche simmetria di una dimensione spazio-temporale superiore.

Basta con la filosofia. Newton fece progredire enormemente la nostra ricerca dell'a-tomo stabilendo un rigoroso schema di sintesi e di previsione che si poteva applicare a un'ampia schiera di problemi fisici. Come abbiamo visto, quando questi principi si diffusero esercitarono una profonda influenza sulle arti pratiche come l'ingegneria e la tecnologia. La meccanica newtoniana, e la sua nuova matematica, sono la vera base di una piramide in cui trovano posto tutti i livelli delle scienze fisiche e della tecnologia. La rivoluzione da essa operata segnò un mutamento di prospettive nel pensiero umano. Senza questo mutamento non ci sarebbe stata nessuna rivoluzione industriale e nessuna ricerca sistematica di nuove conoscenze e nuove tecnologie. Ciò segna una transizione da una società statica, che aspettava di veder accadere le cose, a una società dinamica, che cerca di capire sapendo che la comprensione implica il controllo. E il marchio newtoniano impresse una potente spinta al riduzionismo.

Il contributo di Newton alla fisica e alla matematica e la sua adesione a un universo atomistico sono chiaramente documentati. Ciò che resta da chiarire è l'influenza, sulla sua opera scientifica, della sua «seconda vita», le sue approfondite ricerche alchemiche e la sua devozione alla filosofia occulta, specialmente alle idee ermetiche che si ricollegavano all'antica magia sacerdotale egiziana. Queste attività erano in gran parte segrete. Come professore lucasiano a Cambridge (Stephen Hawking è l'attuale beneficiario) e poi membro dell'establishment politico londinese, Newton non poteva permettere che la sua devozione a queste pratiche religiose sovversive diventasse di dominio pubblico, cosa che l'avrebbe messo in un estremo imbarazzo, se non gettato nella totale rovina.

Possiamo lasciare l'ultimo commento sull'opera di Newton a Einstein:

Perdonami, Newton; hai trovato la sola via che fosse possibile, nella tua epoca, a un uomo del più alto intelletto e capacità creativa. I concetti che hai creato guidano ancor oggi il nostro pensiero fisico, anche se adesso sappiamo che dovranno essere sostituiti da altri, lontanissimi dalla sfera dell'esperienza immediata, se miriamo a una più profonda comprensione delle relazioni.

Il profeta dalmata

Una nota finale a questa prima fase, l'epoca della meccanica, la grande era della fisica classica. La frase «in anticipo sui suoi tempi» è abusata. Sto comunque per usarla; non in riferimento a Galileo o Newton. Entrambi, infatti, vissero al momento giusto, né troppo presto né troppo tardi. Gravità, sperimentazione, misurazione, dimostrazioni matematiche... erano tutte nell'aria. Galileo, Keplero, Brahe e Newton furono accettati – annunciati! – nella loro epoca perché la comunità scientifica era pronta ad accettare le loro idee. Non tutti sono così fortunati.

Ruggero Giuseppe Boscovich, un nativo di Ragusa (l'odierna Dubrovnik) che passò la maggior parte della sua carriera a Roma, era nato nel 1711, sedici anni prima della morte di Newton. Boscovich era un acceso sostenitore delle teorie newtoniane, ma aveva qualche problema con la legge della gravitazione, che egli chiamava un «limite classico», un'approssimazione adeguata quando le distanze erano grandi. Sosteneva che essa era quasi del tutto corretta, ma che esistevano deviazioni, anche se molto lievi, dalla legge dell'inverso del quadrato. Congetturò così che questa legge classica non dovesse più assolutamente funzionare a livello atomico, dove le forze d'attrazione sono sostituite da un'oscillazione fra forze attrattive e repulsive. Un pensiero stupefacente per uno scienziato del XVIII secolo.

Boscovich affrontò anche il vecchio problema dell'azione a distanza. Essendo prima di ogni altra cosa un geometra, escogitò l'idea di *campi di forza* per spiegare come le forze esercitino un controllo sugli oggetti a distanza. Ma aspettate, c'è di più!

Boscovich ebbe un'altra idea, un'idea veramente folle per il XVIII secolo (e forse per ogni secolo). La materia è composta di a-tomi invisibili e indivisibili. Fin qui niente di particolarmente nuovo. Leucippo, Democrito, Galileo, Newton e altri sarebbero stati d'accordo con lui. Adesso viene il bello: Boscovich affermò che queste particelle non avevano dimensioni, erano cioè dei punti geometrici. Chiaramente, come tante altre idee scientifiche anche questa aveva dei precursori, probabilmente nell'antica Grecia, per non tirare in ballo certi accenni riscontrabili nelle opere di Galileo. Come potete ricordare dalla geometria che avete studiato alle superiori, un punto non è nient'altro che una posizione: non ha dimensioni. Ed ecco Boscovich che se ne viene fuori con la proposizione che la materia è composta di particelle prive di dimensioni! Abbiamo trovato una particella che risponde a una simile descrizione solo una ventina d'anni fa. Si chiama quark.

Torneremo al signor Boscovich più avanti.

IV

Ancora alla ricerca dell'atomo: chimici ed elettrologi

> Lo scienziato non sfida l'universo; lo accetta. È un piatto da assaporare, un regno da esplorare; è un'avventura e una gioia senza fine. Esso è compiacente ed elusivo, ma mai monotono. È meraviglioso sia nel piccolo sia nel grande. In breve, la sua esplorazione è la più elevata occupazione per un gentiluomo.
>
> I.I. RABI

Un'ammissione: i fisici non sono stati i soli a cercare l'atomo di Democrito. I chimici hanno certamente lasciato il loro segno durante la lunga era (circa 1600-1900) che vide lo sviluppo della fisica classica. La differenza fra chimici e fisici non è realmente insormontabile. Io ho esordito come chimico, ma sono passato alla fisica, in parte perché era più facile. Da allora, ho avuto spesso modo di notare che alcuni dei miei migliori amici sono in rapporti con dei chimici.

I chimici fecero qualcosa che i fisici non avevano mai fatto prima. Fecero importanti esperimenti sugli atomi. Nonostante le loro considerevoli conquiste sperimentali, Galileo, Newton e gli altri si erano occupati degli atomi su basi puramente teoriche. Non che fossero pigri; non avevano semplicemente l'attrezzatura. Spettò ai chimici effettuare i primi esperimenti che costrinsero gli atomi a rivelare la loro esistenza. In questo capitolo, ci soffermeremo sulla ricca evidenza sperimentale a favore dell'esistenza dell'a-tomo di Democrito. Assisteremo a molte false partenze e ad alcune false piste e risultati male interpretati, da sempre la rovina dello sperimentatore.

L'uomo che scoprì ventiquattro centimetri di nulla

Prima di occuparci dei chimici doc, dobbiamo menzionare uno scienziato, Evangelista Torricelli (1608-1647), che gettò un ponte fra meccanica e chimica nel tentativo di restaurare l'atomismo come concezione scientificamente valida. Ripetiamolo, Democrito aveva detto: «Niente esiste tranne gli atomi e il vuoto; tutto il resto è opinione». Dunque, per provare la validità dell'atomismo occorrevano non solo gli atomi, ma anche lo spazio vuoto fra di essi. Aristotele si era opposto all'idea stessa del vuoto, e anche durante il Rinascimento la Chiesa aveva continuato a insistere nell'asserzione che «la natura ha orrore del vuoto».

Fu qui che intervenne Torricelli. Egli era stato uno dei discepoli di Galileo negli ultimi anni di vita dello scienziato. Nel 1642 Galileo lo invitò a lavorare su un problema. Gli scavatori di pozzi fiorentini avevano osservato che le pompe aspiranti non sollevavano l'acqua a più di dieci metri di altezza. Come mai ciò? L'ipotesi iniziale, avanzata da Galileo e da altri, era che il vuoto fosse una «forza» e che il vuoto parziale prodotto dalle pompe spingesse l'acqua verso l'alto. Ovviamente, Galileo non volle essere coinvolto personalmente nel problema degli scavatori di pozzi e così delegò la faccenda a Torricelli.

Torricelli immaginò che l'acqua non venisse affatto attratta dal vuoto, ma fosse piuttosto *spinta* dalla normale pressione dell'aria. Quando la pompa abbassa la pressione dell'aria sopra la colonna d'acqua, la normale aria che si trova all'esterno della pompa spinge più forte sul fondo dell'acqua, forzandola a risalire lungo il tubo. Torricelli sottopose a verifica la sua teoria l'anno dopo la morte di Galileo. Egli ipotizzò che, siccome il mercurio è 13,5 volte più denso dell'acqua, l'aria dovrebbe essere in grado di sollevare il mercurio a un'altezza pari a solo 1/13,5 dell'altezza dell'acqua, cioè all'incirca 76 centimetri. Torricelli si procurò uno spesso tubo di vetro lungo approssimativamente un metro, chiuso all'estremità inferiore e aperto all'estremità superiore, ed effettuò un semplice esperimento. Riempì fino all'orlo il tubo con mercurio, chiuse l'estremità superiore con un tappo, quindi capovolse il tubo, lo mise in una scodella piena di mercurio e tolse il tappo. Un po' del mercurio si riversò nel piatto. Ma, come Torricelli aveva previsto, 76 centimetri del metallo liquido rimasero nel tubo.

Questo evento capitale nella fisica è spesso citato come l'invenzione del primo barometro, e di questo, naturalmente, si trattò. Torricelli notò che l'altezza del mercurio variava da giorno a giorno misurando fluttuazioni nella pressione atmosferica. Per quanto ci riguarda, però, l'esperimento ebbe un significato più grande. Dimentichiamoci dei 76 centimetri di mercurio che riempivano la maggior parte del tubo. Ciò che è importante per noi sono quegli strani 24 centimetri in cima. Questi pochi centimetri all'estremità superiore del tubo – l'estremità chiusa – non contenevano nulla. Proprio nulla. Niente mercurio, niente aria, nulla. Be', quasi nulla. Si tratta di un vuoto accettabile, ma contiene un po' di vapore di mercurio, la cui quantità dipende dalla temperatura. Il vuoto è circa 10^{-6} torr. (Il torr, dal nome dello scienziato, è un'unità di misura della pressione; 10^{-6} torr corrispondono a circa un miliardesimo della nor-

male pressione atmosferica.) Le pompe moderne possono arrivare a 10^{-11} torr e anche di più. In ogni caso, Torricelli aveva ottenuto il primo vuoto artificiale di buona qualità. Non c'era modo di ingannarsi su questa conclusione. La natura può avere o no orrore del vuoto, ma deve sopportarlo pazientemente. Adesso che avevamo dimostrato l'esistenza dello spazio vuoto, avevamo bisogno degli atomi da metterci dentro.

Il gas si comprime

Entra in scena Robert Boyle. Questo chimico, irlandese di nascita (1627-1691), fu criticato dai colleghi per il suo modo di pensare troppo da fisico e troppo poco da chimico, ma è chiaro che le sue conquiste appartengono principalmente al dominio della chimica. Come sperimentatore, i suoi tentativi furono spesso dei fallimenti; tuttavia contribuì a far progredire le idee atomistiche in Inghilterra e sul continente. Fu conosciuto talvolta come «il padre della chimica» e «lo zio del conte di Cork».

Influenzato dall'opera di Torricelli, Boyle divenne preda del fascino del vuoto. Egli affidò a Robert Hooke, lo stesso Hooke che amava tanto Newton, l'incarico di costruirgli una pompa ad aria perfezionata. La pompa ad aria gli ispirò l'interesse per i gas che, come si rese conto, rappresentavano una chiave d'accesso all'atomismo. È possibile che, in questo, gli sia stato d'aiuto lo stesso Hooke, il quale aveva osservato che la pressione esercitata da un gas sulle pareti del suo contenitore – per esempio dall'aria sulle pareti di un pallone – potrebbe essere il risultato di una moltitudine di atomi. Noi non vediamo rigonfiamenti individuali causati dagli atomi all'interno del pallone, perché ce ne sono miliardi di miliardi che simulano una lieve spinta verso l'esterno.

Come l'esperimento di Torricelli, anche quello di Boyle utilizzò il mercurio. Preso un tubo fatto a J di circa cinque metri, ne sigillò l'estremità corta; quindi versò del mercurio nell'estremità lunga aperta sino a riempire la curva inferiore della J. Continuò poi ad aggiungere mercurio dall'estremità aperta. Più ne versava, più lo spazio disponibile per l'aria contenuta nell'estremità corta si riduceva. Corrispondentemente, la pressione dell'aria nel piccolo volume aumentava, come egli poté facilmente misurare mediante l'altezza eccedente di mercurio nell'estremità aperta del tubo. Boyle scoprì che il volume del gas variava in proporzione inversa alla pressione esercitata su di esso. La pressione del gas contenuto nell'estremità chiusa è il risultato del peso eccedente del mercurio sommato alla pressione esercitata dall'atmosfera sull'estremità aperta. Se raddoppiava la pressione con l'aggiunta di mercurio, il volume dell'aria diminuiva della metà. Triplicando la pressione, il volume si riduceva a un terzo, e così via. Questo effetto fu conosciuto come legge di Boyle, una pietra miliare della chimica fino a oggi.

Ancor più importante è una sbalorditiva conseguenza di questo esperimento: l'aria, o qualsiasi gas, può essere compressa. Un modo di spiegare questo fatto è di pensare i gas come composti di particelle separate da spazio vuoto. Sotto pressione, le particelle vengono spinte ad ammassarsi più fittamente. È questa una prova dell'esistenza degli atomi? Sfortunatamente, si possono immaginare spiegazioni alternative, e l'esperimento di Boyle non faceva che fornire un'evidenza compatibile con l'idea atomistica. L'evidenza, tuttavia, era abbastanza forte da contribuire a convincere, fra gli altri, Isaac Newton che una teoria atomica della materia era la strada giusta da seguire. Come minimo, l'esperimento di compressione di Boyle metteva in discussione l'assunzione aristotelica che la materia fosse continua. Rimaneva il problema dei liquidi e dei solidi, che non si potevano comprimere con la stessa facilità dei gas. Ciò non significava che essi non fossero composti di atomi, ma solo che contenevano meno spazio vuoto.

Boyle fu un sostenitore della sperimentazione che, a onta delle brillanti imprese di Galileo e altri, nel XVII secolo era ancora vista con sospetto. Egli ingaggiò una lunga discussione con Spinoza, il filosofo (e molatore di lenti) olandese, sulla questione della validità della dimostrazione fornita dall'esperimento. Per Spinoza, solo il pensiero logico costituisce una dimostrazione: l'esperimento non è nient'altro che uno strumento per confermare o confutare un'idea. Anche scienziati della statura di Huygens e Leibniz mettevano in dubbio il valore dell'esperimento. Gli sperimentatori hanno sempre avuto vita difficile.

Gli sforzi di Boyle per fornire una prova dell'esistenza degli atomi (egli preferiva il termine «corpuscoli») fecero progredire la scienza della chimica, che all'epoca si trovava un po' nei pasticci. La convinzione prevalente era ancora la vecchia idea degli elementi, che risaliva ai quattro originari (terra, aria, acqua e fuoco) di Empedocle, modificata negli anni fino a includere il sale, lo zolfo, il mercurio, il flemma (flemma?), l'olio, lo spirito, l'acido e gli alcali. Nel XVII secolo, queste non rappresentavano soltanto le sostanze più semplici costituenti la materia, secondo la teoria dominante, ma si pensava che

fossero gli *ingredienti essenziali del tutto*. Per fare un esempio, ci si aspettava che l'acido fosse presente in ogni composto. In quale confusione devono essersi trovati i chimici! Con questi criteri deve essere stato impossibile analizzare anche la più semplice reazione. I «corpuscoli» di Boyle spianarono la strada a un metodo più semplice e più riduzionista di analizzare i composti.

Il gioco dei nomi

Uno dei problemi di fronte ai quali si trovavano i chimici nel XVII e XVIII secolo era dato dal fatto che i nomi attribuiti ai vari elementi oggetto dei loro studi non avevano senso. Nel 1787, Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794) cambiò completamente le cose con la sua classica opera *Metodo di nomenclatura chimica*. Si potrebbe chiamare Lavoisier il Newton della chimica. (Forse i chimici chiamano Newton il Lavoisier della fisica.)

Lavoisier fu un personaggio straordinario. Esperto geologo, fu anche un pioniere dell'agricoltura scientifica, un abile finanziere e un riformatore sociale che ebbe un ruolo di spicco nella Rivoluzione francese. Stabilì un nuovo sistema di pesi e di misure che portò al sistema metrico decimale in uso oggi nelle nazioni civili. (Negli anni Novanta gli Stati Uniti, per non rimanere troppo indietro, si stanno convertendo pian piano a esso).

Il secolo precedente aveva prodotto una montagna di dati, ma senza la benché minima organizzazione. I nomi delle sostanze – ponfòlige, colcotar, burro di arsenico, fiori di zinco, orpimento, etiope marziale – erano pittoreschi, ma non rimandavano a nessun ordine sottostante. Uno dei mentori di Lavoisier ebbe a dirgli un giorno: «L'arte di ragionare non è niente più di un linguaggio ben organizzato»; e Lavoisier, intimamente colpito, si accollò l'impresa di riordinare e ridenominare tutta la chimica. Egli cambiò l'etiope marziale in ossido di ferro; l'orpimento diventò il solfuro di arsenico. I vari prefissi, come *ossi-* e *solf-*, e suffissi, come *-uro* e *-ato*, contribuirono a organizzare e catalogare gli innumerevoli composti. Che cosa c'è in un nome? Talvolta il nome è il destino. Archibald Leach sarebbe mai diventato una star del cinema se non avesse cambiato il suo nome in Cary Grant?

Per Lavoisier le cose non furono così semplici. Prima di riformare la nomenclatura, doveva risistemare la stessa teoria chimica. Il contributo più importante di Lavoisier alla chimica riguardò la natura dei gas e della combustione. I chimici del XVIII secolo credevano che l'acqua, riscaldata, si trasformasse in aria, il solo vero gas. Gli studi di Lavoisier contribuirono a far sì che ci si rendesse conto, per la prima volta, che qualsiasi elemento può esistere in tre stati: solido, liquido e di «vapore». Egli stabilì anche che l'atto della combustione era una reazione chimica in cui sostanze come il carbonio, lo zolfo e il fosforo si combinavano con l'ossigeno. Demolì la teoria del flogisto, un ostacolo di stampo aristotelico a una reale comprensione delle reazioni chimiche. Ma, più di tutto, fu lo stile di indagine di Lavoisier, basato su precisione, raffinata tecnica sperimentale e analisi critica dei dati acquisiti, a dare alla chimica il suo indirizzo moderno. Anche se il contributo diretto di Lavoisier all'atomismo è stato minore, senza il suo fondamento gli scienziati del secolo seguente non avrebbero potuto scoprire la prima prova diretta dell'esistenza degli atomi.

Il «pellicano» e il pallone

Lavoisier era affascinato dall'acqua. A quell'epoca molti scienziati erano ancora convinti che l'acqua fosse un elemento fondamentale, che non poteva essere scisso in componenti più piccoli. Alcuni credevano anche nella trasmutazione, e pensavano che l'acqua potesse, fra le altre cose, trasformarsi in terra. Questa credenza aveva una base sperimentale. Se fate bollire una pentola d'acqua abbastanza a lungo, alla fine si formerà un residuo solido sulla superficie. Questi scienziati avrebbero detto che l'acqua si è tramutata in un altro elemento. Anche il grande Robert Boyle credeva nella trasmutazione. Egli aveva effettuato degli esperimenti che mostravano che le piante crescono assorbendo acqua. Ergo, l'acqua si trasforma in steli, foglie, fiori, e così via. È chiaro perché fossero in tanti a diffidare degli esperimenti: simili conclusioni bastano a farvi cominciare a dar ragione a Spinoza.

Lavoisier si rese conto che il difetto di questi esperimenti stava nella misurazione. Egli effettuò i suoi esperimenti bollendo acqua distillata in uno speciale recipiente detto «pellicano». Esso era studiato in modo che il vapore acqueo prodotto dall'ebollizione venisse conservato e condensato in una capsula sferica dalla quale ritornava al recipiente di ebollizione attraverso due tubi a forma di manubrio. In questo modo, si evitava qualsiasi perdita d'acqua. Lavoisier pesò accuratamente il recipiente e l'acqua distillata, poi bollì l'acqua per 101 giorni. Il lungo esperimento produsse un'apprezzabile quantità di residuo solido. Lavoisier pesò allora ogni elemento: il «pellicano», l'acqua e il residuo. Dopo 101 giorni di bollitura, l'acqua *aveva conservato esattamente lo stesso peso*, il che la dice lunga sulla meticolosa

tecnica di Lavoisier. Il «pellicano», però, pesava un po' meno. Il peso del residuo era uguale al peso perduto dal recipiente. Dunque, il residuo che si era formato nell'acqua bollita non era acqua tramutata, ma vetro, silice dissolta dal recipiente. Lavoisier aveva mostrato che la sperimentazione senza misurazione è inutile, addirittura fuorviante. La bilancia chimica di Lavoisier fu il suo violino; egli lo suonò per rivoluzionare la chimica.

Questo per quanto riguarda la trasmutazione. Ma molte persone, compreso lo stesso Lavoisier, credevano ancora che l'acqua fosse un elemento fondamentale. Lavoisier pose fine a questa illusione quando inventò un apparecchio con un doppio ugello. Egli faceva scorrere un gas diverso attraverso ogni ugello, sperando che i due gas si combinassero per formare una terza sostanza. Un giorno decise di sperimentare con l'ossigeno e l'idrogeno, aspettandosi che essi si mescolassero in qualche tipo di acido. Ciò che ottenne fu acqua. Egli la descrisse «pura come acqua distillata». Perché no, dal momento che l'aveva fatta apparire dal nulla come per magia? Ovviamente, l'acqua non era un elemento, ma una sostanza che poteva essere prodotta artificialmente da due parti di idrogeno e una di ossigeno.

Nel 1783, si verificò un evento storico che avrebbe indirettamente contribuito a far ulteriormente progredire la chimica. I fratelli Montgolfier effettuarono il primo volo umano con palloni ad aria calda. Ben presto, J.-A.-C. Charles, un insegnante di fisica nientemeno, si innalzò a un'altezza di tremila metri con un pallone riempito di idrogeno. Lavoisier rimase impressionato; egli vide in questi palloni la possibilità di innalzarsi al di sopra delle nuvole per studiare le meteore. Di lì a poco, fu nominato in una commissione che aveva il compito di esaminare metodi per produrre gas a basso costo per i palloni aerostatici. Egli escogitò una serie di operazioni su larga scala tese a produrre idrogeno decomponendo l'acqua nelle sue parti costitutive mediante filtraggio attraverso una canna di cannone piena di anelli di ferro caldi.

A questo punto, nessuna persona sensata credeva più che l'acqua fosse un elemento. Ma una sorpresa ancora più grande attendeva Lavoisier. Egli stava ora scomponendo acqua in grandi quantità e i numeri risultavano sempre identici. L'acqua produceva ossigeno e idrogeno in un rapporto di peso di otto a uno ogni volta. Era chiaro che fosse all'opera qualche meccanismo preciso che si sarebbe potuto spiegare in termini di atomi.

Lavoisier non speculò molto sull'atomismo, tranne che per dire che delle particelle semplici indivisibili hanno un ruolo determinante nella chimica e che si conosce ben poco di esse. Come sappiamo, egli non ebbe mai l'opportunità di ritirarsi a scrivere le proprie memorie, nelle quali avrebbe potuto elaborare ulteriormente le sue idee sugli atomi. Dopo essere stato fra i primi sostenitori della Rivoluzione, Lavoisier cadde in disgrazia durante il regime del Terrore e fu mandato alla ghigliottina nel 1794, all'età di cinquant'anni.

Il giorno dopo l'esecuzione, il matematico Joseph-Louis Lagrange riassunse così la tragedia: «Non ci è voluto che un istante per tagliare quella testa, e cento anni non basteranno a produrne un'altra simile».

Ritorno all'atomo

Le implicazioni dell'opera di Lavoisier furono studiate, una generazione dopo, da un modesto maestro di scuola inglese che si chiamava John Dalton (1766-1844). In Dalton abbiamo la personificazione del classico stereotipo cinematografico dello scienziato. Egli sembra aver avuto una vita privata completamente priva di eventi. Non si sposò mai dal momento che, come egli stesso diceva, «la mia testa è troppo piena di triangoli, processi chimici, esperimenti elettrici, e via dicendo, per preoccuparmi più di tanto del matrimonio». Un gran giorno, per lui, fu quando fece una scampagnata o forse partecipò a un convegno di quaccheri.

Dalton cominciò come umile maestro in un convitto dove riempiva le ore libere leggendo le opere di Newton e di Boyle. Egli attese per oltre un decennio a questo lavoro prima di approdare a un incarico di professore di matematica in un college di Manchester. Quando arrivò, fu avvertito che avrebbe dovuto insegnare anche chimica. Si lamentava di avere ventun ore di lezione alla settimana! Nel 1800, abbandonò l'incarico per aprire una sua scuola, dove trovò finalmente il tempo di dedicarsi alle sue ricerche chimiche. Fino al momento in cui rese nota la sua teoria atomica della materia, poco dopo gli inizi del secolo (fra il 1803 e il 1808), Dalton fu considerato dalla comunità scientifica poco più che un dilettante. Per quanto ne sappiamo, egli fu il primo a risuscitare formalmente il termine democriteo *atomo* a significare le infinitesimali particelle indivisibili che compongono la materia. Con una differenza, però. Ricorderete che Democrito aveva affermato che gli atomi di differenti sostanze hanno forme diverse. Nello schema di Dalton era il peso a svolgere il ruolo principale.

La teoria atomica fu il contributo più importante di Dalton. Che essa fosse «nell'aria» (e lo era) o che (come sostengono alcuni studiosi) la storia attribuisca a Dalton un merito eccessivo, nessuno mette in dub-

bio la tremenda portata della teoria atomica nei suoi riflessi sulla chimica, una disciplina che diventò presto una delle scienze più capillarmente influenti. Che la prima «dimostrazione» sperimentale dell'esistenza degli atomi sia venuta dalla chimica è anche estremamente appropriato. Si ricordi la passione degli antichi Greci: vedere un principio, un'*arché* immutabile in un mondo in cui il cambiamento è dappertutto. L'a-tomo risolse la crisi. Riordinando gli atomi si può creare tutto il cambiamento che si vuole, ma lo zoccolo duro della nostra esistenza, l'a-tomo, è immutabile. In chimica, un numero relativamente piccolo di atomi fornisce una scelta enorme a causa delle possibili combinazioni: l'atomo di carbonio con uno o due atomi di ossigeno, idrogeno con ossigeno o cloro o zolfo, e così via. Tuttavia, gli atomi di idrogeno sono sempre idrogeno, identici l'uno all'altro, immutabili. Ma qui stiamo uscendo dal seminato, dimenticando il nostro eroe Dalton.

Egli, avendo osservato che le proprietà dei gas possono ricevere una spiegazione migliore postulando l'esistenza di atomi, applicò questa idea alle reazioni chimiche. Notò che un composto chimico contiene sempre le stesse proporzioni dei suoi elementi costitutivi. Per esempio, carbonio e ossigeno si combinano per formare il monossido di carbonio (CO). Per fare il CO occorrono sempre 12 grammi di carbonio e 16 grammi di ossigeno, o 12 libbre di carbonio e 16 libbre di ossigeno. Qualunque unità di misura usiate, il rapporto è sempre di 12 a 16. Quale può essere la spiegazione? Se un atomo di carbonio pesa dodici unità e un atomo di ossigeno pesa 16 unità, allora i pesi macroscopici del carbonio e dell'ossigeno che svaniscono nel CO avranno questo stesso rapporto. Questo sarebbe, in sé e per sé, un argomento piuttosto debole a favore degli atomi. Tuttavia, quando si fanno composti idrogeno-ossigeno e idrogeno-carbonio, i pesi relativi dell'idrogeno, del carbonio e dell'ossigeno sono sempre di 1 a 12 a 16. Qui il campo delle spiegazioni alternative comincia a restringersi. Quando la stessa logica è applicata a molte dozzine di composti, gli atomi diventano la sola conclusione plausibile.

Dalton rivoluzionò la scienza dichiarando che l'atomo è l'unità fondamentale dell'elemento chimico e che ogni elemento chimico ha un proprio peso. Come egli scrisse nel 1808:

> Ci sono tre distinzioni nei tipi di corpi, o tre stati, che hanno particolarmente attratto l'attenzione dei chimici filosofici; vale a dire, quelli che sono contrassegnati dai termini fluidi elastici, liquidi e solidi. Un esempio notorio di corpo che, in certe circostanze, è capace di assumere tutti e tre gli stati, ci è dato dall'acqua. Nel vapore riconosciamo un fluido perfettamente elastico, nell'acqua un liquido perfetto e nel ghiaccio un solido completo. Queste osservazioni hanno tacitamente portato alla conclusione, che sembra universalmente accettata, che tutti i corpi di grandezza sensibile, siano essi liquidi o solidi, sono costituiti da un grande numero di particelle estremamente piccole, di atomi di materia legati insieme da una forza di attrazione che è più o meno intensa a seconda delle circostanze [...].
>
> L'analisi e la sintesi chimica non fanno molto di più che organizzare la separazione e l'unione reciproca delle particelle. Nessuna nuova creazione o distruzione di materia cade entro il raggio della chimica. Cercare di creare o distruggere una particella di idrogeno sarebbe lo stesso che tentare di introdurre un nuovo pianeta nel sistema solare o di annientarne uno già esistente. Tutti i cambiamenti che possiamo produrre consistono nel separare le particelle che sono in uno stato di coesione o combinazione e congiungere quelle che sono precedentemente separate.

Il contrasto fra gli stili scientifici di Lavoisier e Dalton è interessante. Lavoisier era un meticoloso misuratore. Egli insisteva sulla precisione, e ciò si tradusse in una spettacolare ristrutturazione della metodologia chimica. Dalton fece molte cose sbagliate. Usò 7 invece di 8 per il peso relativo dell'ossigeno e dell'idrogeno. Sbagliò sulla composizione dell'acqua e dell'ammoniaca. Nondimeno, fece una delle più profonde scoperte scientifiche dell'epoca: dopo circa 2200 anni di speculazioni e di vaghe ipotesi, Dalton stabilì la realtà degli atomi. Egli presentò una nuova concezione, che «se confermata, come non dubito avverrà con il tempo, produrrà i più importanti cambiamenti nel sistema della chimica e ridurrà il tutto a una scienza di grande semplicità». La sua strumentazione non consisteva in un potente microscopio, né in un acceleratore di particelle, ma in alcune provette, una bilancia chimica, la letteratura scientifica del suo tempo e l'ispirazione creativa.

Ciò che Dalton chiamava atomo non era certamente l'a-tomo di Democrito. Noi adesso sappiamo che, per esempio, un atomo di ossigeno non è indivisibile, ma ha una complessa sottostruttura. Ma il nome è rimasto: ciò che oggi chiamiamo comunemente atomo è l'atomo di Dalton. È un atomo *chimico*, una singola unità di un *elemento chimico*, come l'idrogeno, l'ossigeno, il carbonio o l'uranio.

Titolo nel «Royal Enquirer» del 1815:

CHIMICO SCOPRE LA PARTICELLA FONDAMENTALE;
LASCIA BOA CONSTRICTOR E URINA

A ogni morte di papa arriva uno scienziato che fa un'osservazione così semplice ed elegante che non può che avere ragione, un'osservazione che sembra risolvere in un battibaleno un problema che

ha tormentato la scienza per migliaia di anni. Una volta ogni cento morti di papa, lo scienziato ha effettivamente ragione.

Tutto ciò che si può dire di William Prout è che ci arrivò molto vicino. Prout avanzò una delle più grandi congetture «quasi corrette» del suo secolo. La sua congettura fu respinta per le ragioni sbagliate e dalla mano volubile del fato. Intorno al 1815, questo chimico inglese pensò di aver trovato la particella di cui è costituita la materia. Si trattava dell'atomo di idrogeno.

Per essere onesti, si trattò di un'idea profonda ed elegante, anche se «leggermente» sbagliata. Prout stava facendo ciò che fa un buon scienziato: cercare la semplicità, nella tradizione dei Greci. Egli stava cercando un denominatore comune fra i venticinque elementi chimici conosciuti ai suoi tempi. Francamente, Prout era un po' fuori dal suo campo. Per i contemporanei, il suo merito principale stava nell'aver scritto il testo fondamentale sull'urina. Aveva anche effettuato degli approfonditi esperimenti con gli escrementi del boa constrictor. Come ciò lo abbia portato all'atomismo è una questione su cui non mi azzardo a speculare.

Prout sapeva che l'idrogeno, con un peso atomico di 1, era il più leggero di tutti gli elementi conosciuti. Forse, disse Prout, l'idrogeno è la «materia primigenia» e tutti gli altri elementi non sono che combinazioni di idrogeno. Nello spirito degli antichi, egli chiamò questa quintessenza «protilo». La sua idea era più che sensata, poiché i pesi atomici della maggior parte degli elementi erano all'incirca multipli interi del peso atomico dell'idrogeno. La ragione di questo fatto era che i pesi relativi risultavano allora piuttosto imprecisi. Quando la precisione dei pesi atomici migliorò, l'ipotesi di Prout fu annientata (per la ragione sbagliata). Per esempio, si trovò che il cloro aveva un peso relativo di 35,5. Ciò distrusse l'idea di Prout, dal momento che non si può avere metà di un atomo. Noi adesso sappiamo che il cloro naturale è una miscela di due varietà, o isotopi. Una ha 35 e l'altra 37 «idrogeni». Questi «idrogeni» sono in effetti neutroni e protoni, che hanno quasi la stessa massa.

Ciò che Prout aveva realmente ipotizzato era l'esistenza del nucleone (una delle particelle, protone o neutrone, che costituiscono il nucleo) come unità fondamentale degli atomi. Quello di Prout fu un tentativo straordinariamente gravido di conseguenze. La ricerca di un sistema più semplice dell'insieme di circa venticinque elementi era destinata al successo.

Non nel XVIII secolo, però.

Giocando a carte con gli elementi

Finiamo la nostra precipitosa corsa attraverso più di duecento anni di chimica con Dmitrij Mendeleev (1834-1907), il chimico siberiano inventore della tavola periodica degli elementi. Essa rappresentò un enorme passo avanti nella classificazione e costituì, al tempo stesso, un progresso nella ricerca dell'atomo di Democrito.

Ciononostante, Mendeleev ebbe parecchie contrarietà durante la sua vita. Questo strano tipo – sembra che sia sopravvissuto a una dieta basata su latte acido (stava controllando qualche follia medica) – fu oggetto di notevole derisione da parte dei colleghi per la sua tavola. Fu anche un grande difensore degli studenti all'Università di Pietroburgo e quando, verso la fine della sua carriera, si mise alla loro testa durante una contestazione, l'amministrazione lo cacciò a pedate.

Senza gli studenti, egli non avrebbe mai potuto costruire la sua tavola periodica. Al primo anno di insegnamento, nel 1867, Mendeleev non riuscì a trovare un testo soddisfacente per i suoi corsi, e così cominciò a scriverne uno proprio. Egli concepiva la chimica come «la scienza della massa» – ancora questo interesse per la massa – e nel suo manuale se ne uscì con la semplice idea di riordinare gli elementi conosciuti secondo l'ordine dei loro pesi atomici.

Lo fece giocando a carte. Scrisse i simboli degli elementi, con i loro pesi atomici e le loro varie proprietà (per esempio, sodio: metallo attivo; argo: gas inerte), su fogli separati. A Mendeleev piaceva giocare a «pazienza», una specie di solitario. Così, giocò a «pazienza» con gli elementi, disponendo le carte in modo che risultassero in ordine di peso atomico crescente. Scoprì allora una certa periodicità. Proprietà chimiche analoghe riapparivano in elementi distanziati fra loro di otto carte; per esempio, litio, sodio e potassio sono tutti chimicamente dei metalli attivi, e le loro posizioni sono 3, 11 e 19. Analogamente, idrogeno (1), fluoro (9) e cloro (17) sono gas attivi. Egli ridispose le carte in otto colonne verticali, in ciascuna delle quali comparivano gli elementi con proprietà analoghe.

Mendeleev fece qualcos'altro di non ortodosso. Non si sentì obbligato a riempire tutte le caselle della sua griglia. Proprio come accade in un solitario, sapeva che alcune carte erano nascoste nel mazzo. Nelle sue intenzioni, la tavola doveva avere un senso non solo leggendo per riga, ma anche per colonna. Se uno spazio richiedeva un elemento con particolari proprietà e non ne esisteva nessuno del genere, egli lo lasciava vuoto, anziché cercare di inserire a forza nella casella un elemento esistente. Mendeleev diede anche

un nome agli spazi vuoti, usando il prefisso *eka-*, una parola sanscrita che vuol dire «uno». Per esempio, ekaalluminio ed ekasilicio denotavano le lacune nelle colonne verticali, rispettivamente sotto l'alluminio e il silicio.

Le lacune nella tavola furono uno dei motivi per cui Mendeleev fu così abbondantemente deriso. Tuttavia, cinque anni dopo, nel 1875, fu scoperto il gallio, che risultò essere l'ekaalluminio, con tutte le proprietà previste dalla tavola periodica. Nel 1886 fu scoperto il germanio, che risultò essere l'ekasilicio. Il gioco del solitario chimico cominciò a non apparire più così insensato.

Uno dei fattori che resero possibile la tavola di Mendeleev fu che i chimici erano diventati più accurati nel misurare i pesi atomici degli elementi. Lo stesso Mendeleev aveva corretto i pesi atomici di diversi elementi, ciò che non gli aveva guadagnato molti amici fra gli importanti scienziati le cui cifre erano state rettificate.

Nessuno comprese la ragione delle regolarità presenti nella tavola periodica fino alla scoperta del nucleo e dell'atomo quantico nel secolo successivo. In realtà, l'effetto iniziale della tavola periodica fu di scoraggiare gli scienziati. C'erano cinquanta o più sostanze chiamate «elementi», ingredienti fondamentali dell'universo che si riteneva non potessero essere ulteriormente suddivisi, il che significava più di cinquanta «atomi» diversi, e il numero doveva presto aumentare a oltre novanta. Questo ci allontana di molto da un'unità fondamentale. Guardare la tavola periodica verso la fine dell'Ottocento avrebbe indotto gli scienziati a strapparsi i capelli. Dov'è la semplice unità che siamo andati cercando per oltre due millenni? Tuttavia, l'ordine identificato da Mendeleev in questo caos rimandava a una più profonda semplicità. Retrospettivamente, l'organizzazione e le regolarità della tavola periodica reclamavano un atomo con una struttura che si ripetesse periodicamente. I chimici, però, non erano così disposti ad abbandonare l'idea che i loro atomi – idrogeno, ossigeno, eccetera – fossero indivisibili. Un approccio più fecondo sarebbe scaturito da una visuale diversa.

Non si deve incolpare Mendeleev della complessità della tavola periodica. Egli stava soltanto organizzando il caos come meglio poteva, facendo ciò che fanno i bravi scienziati: cercare un ordine in mezzo alla complessità. Durante la sua vita, non fu mai oggetto di grande stima da parte dei colleghi, non vinse mai il premio Nobel, anche se visse ancora diversi anni dopo la sua istituzione. Alla sua morte nel 1907, tuttavia, egli ricevette l'onore estremo per un insegnante. Un gruppo di studenti seguì il suo funerale sventolando in alto sopra la testa la tavola periodica. La sua eredità è la famosa carta degli elementi appesa in ogni laboratorio, in ogni aula di chimica di ogni liceo del mondo.

Per lo stadio finale dell'oscillante sviluppo della fisica classica ci spostiamo disinvoltamente dallo studio della materia e delle particelle allo studio di una forza. In questo caso, l'elettricità. Nel XIX secolo, l'elettricità era considerata quasi una scienza in se stessa.

Si trattava di una forza misteriosa. Al suo primo apparire, non sembrò presentarsi naturalmente, tranne che nella forma terrifica dei fulmini. Così, i ricercatori dovevano occuparsi di una cosa «innaturale» per studiare l'elettricità. Dovevano «fabbricare» questo fenomeno prima di poterlo analizzare. Abbiamo poi finito per renderci conto che l'elettricità è dappertutto; l'intera materia è di natura elettrica. Tenetevelo in mente per quando arriveremo all'epoca moderna, quando discuteremo di particelle esotiche «fabbricate» negli acceleratori.

Nel XIX secolo, l'elettricità era considerata altrettanto esotica dei quark ai giorni nostri. Oggi siamo circondati dall'elettricità, un altro esempio di come gli uomini possono modificare il loro ambiente.

In questo primo periodo, ci sono stati parecchi eroi dell'elettricità e del magnetismo, molti dei quali hanno lasciato i loro nomi a varie unità elettriche. Tra di essi ci sono Charles-Augustin de Coulomb (l'unità della carica), André-Marie Ampère (corrente), Georg Simon Ohm (resistenza), James Watt (potenza elettrica) e James Joule (energia). Luigi Galvani ci ha dato il galvanometro, uno strumento per misurare le correnti, e Alessandro Volta il volt (l'unità di misura della differenza di potenziale o forza elettromotrice). Analogamente, K.F. Gauss, H.C. Oersted e W.E. Weber hanno tutti lasciato la loro impronta e i loro nomi su quantità elettriche calcolate per generare timore e ripugnanza nei futuri studenti di ingegneria elettrica. Solo Benjamin Franklin, malgrado i suoi importanti contributi, non è riuscito a legare il suo nome a nessuna unità elettrica. Povero Ben! Be', almeno ha il suo cappello a cilindro e il suo ritratto sulle banconote da cento dollari. Franklin notò che ci sono due tipi di elettricità. Egli avrebbe potuto chiamarne una Joe e l'altra Moe, ma scelse invece i segni più (+) e meno (–). Franklin chiamò la quantità, diciamo, di elettricità negativa in un oggetto «carica elettrica». Introdusse anche il concetto di conservazione della carica, la condizione cioè per cui, quando l'elettricità è trasferita da un corpo a un altro, la carica totale deve risultare zero. Ma i veri giganti, fra tutti questi scienziati, furono due inglesi, Michael Faraday e James Clerk Maxwell.

Le rane elettriche

La nostra storia comincia verso la fine del Settecento, con l'invenzione da parte di Galvani della batteria, perfezionata poi da un altro italiano, Volta. Lo studio dei riflessi della rana a opera di Galvani – egli appendeva i muscoli di una rana a un supporto fuori dalla finestra e li osservava contrarsi durante i temporali – dimostrò l'esistenza dell'«elettricità animale». Questo stimolò l'opera di Volta intorno al 1790, il che fu un bene. Immaginate un po' Henry Ford che installa una cassa di rane su ogni macchina con istruzioni all'automobilista del tipo di: «Le rane vanno nutrite ogni cinquanta chilometri». Volta scoprì che l'elettricità della rana aveva in realtà a che fare con due metalli diversi separati da qualche... brandello di rana, dal momento che le rane di Galvani erano appese con ganci di rame a un supporto di ferro. Egli riuscì così a produrre una corrente elettrica senza rane, sperimentando con differenti coppie di metalli separati da frammenti di pelle immersi in acqua salata (che stavano al posto delle rane). Ben presto, creò una «pila» fatta di piatti di zinco e rame, rendendosi conto che più grande era la pila, più forte la corrente che era in grado di far passare attraverso un circuito esterno. Essenziale, in questo lavoro, fu l'invenzione di un elettrometro per misurare la corrente. Questa ricerca produsse due importanti risultati: uno strumento di laboratorio per produrre correnti e la scoperta che l'elettricità poteva essere prodotta da reazioni chimiche.

Un altro importante progresso fu la misurazione dell'intensità e del comportamento della forza elettrica fra due palle cariche a opera di Coulomb. Per effettuare questa misurazione, egli inventò la bilancia di torsione, un arnese straordinariamente sensibile alle forze molto piccole. La forza che egli stava inseguendo era, naturalmente, l'elettricità. Usando la bilancia di torsione, Coulomb determinò che la forza fra cariche elettriche variava inversamente al quadrato della distanza fra di esse. Egli scoprì anche che cariche di segno uguale (+ + o – –) si respingevano reciprocamente, mentre cariche di segno diverso (+ –) si attraevano. La legge di Coulomb, che ci dà la F per le cariche elettriche, giocherà un ruolo cruciale nella nostra comprensione dell'atomo.

In una vera e propria frenesia di attività, incominciò una serie di esperimenti su ciò che gli scienziati, in un primo tempo, pensarono fossero i fenomeni separati dell'elettricità e del magnetismo. In un breve periodo di circa cinquant'anni (1820-1870), questi esperimenti portarono a una grande sintesi che si concretizzò in una teoria unificata che includeva non solo l'elettricità e il magnetismo ma anche la luce

Il segreto del legame chimico: ancora le particelle

Gran parte delle nostre prime conoscenze sull'elettricità hanno avuto origine da scoperte nel campo della chimica, in particolare di quella che si chiama attualmente elettrochimica. La pila di Volta insegnò agli scienziati che una corrente elettrica può scorrere in un circuito costituito da un filo che collega i due poli di una pila. Quando il circuito viene interrotto collegando dei fili a dei pezzi di metallo immersi in un liquido, la corrente scorre attraverso il liquido. Gli scienziati scoprirono che la corrente nel liquido crea un processo chimico: la decomposizione. Se il liquido è acqua, si forma dell'idrogeno vicino a un pezzo di metallo e dell'ossigeno vicino all'altro. La proporzione di 2 parti di idrogeno a 1 di ossigeno sta a indicare che l'acqua si è decomposta nei suoi elementi costitutivi. Una soluzione di cloruro di sodio darebbe come risultato una placca di sodio a un «terminale» e la comparsa di gas cloro verdastro all'altro. Da tutto ciò sarebbe presto nata l'industria dell'elettroplaccatura.

La disgregazione dei composti chimici mediante corrente elettrica stava a indicare una connessione profonda fra legame atomico e forze elettriche. Acquistò credito l'idea che le attrazioni fra atomi – le «affinità» fra elementi chimici – fossero di natura elettrica.

Michael Faraday cominciò la sua opera nel campo dell'elettrochimica sistematizzando la nomenclatura. Come nel caso della denominazione degli elementi chimici da parte di Lavoisier, ciò fu di parecchio aiuto. Faraday chiamò i metalli immersi nel liquido «elettrodi». L'elettrodo negativo era un «catodo», quello positivo un «anodo». Quando l'elettricità scorreva attraverso l'acqua, provocava una migrazione di atomi carichi attraverso il liquido dal catodo all'anodo. Di norma, gli atomi sono neutri, sprovvisti di carica sia positiva sia negativa. Ma la corrente elettrica caricava in qualche modo gli atomi. Faraday chiamò questi atomi carichi «ioni». Oggi sappiamo che uno ione è un atomo che si è caricato perché ha perso o acquistato uno o più elettroni. Ai tempi di Faraday non si sapeva nulla degli elettroni. Non si sapeva che cosa fosse l'elettricità. Ma Faraday sospettò l'esistenza degli elettroni? Negli anni intorno al 1830, egli effettuò una serie di spettacolari esperimenti che si concretizzarono in due semplici frasi riassuntive note come leggi dell'elettrolisi di Faraday:

1. La massa di sostanza chimica liberata a un elettrodo è proporzionale alla corrente moltiplicata per la durata temporale del suo

flusso. In altri termini, la massa liberata è proporzionale alla quantità di elettricità che passa attraverso il liquido.

2. La massa liberata da una quantità fissata di elettricità è proporzionale al peso atomico della sostanza moltiplicato per il numero di atomi nel composto.

Ciò che significano queste leggi è che l'elettricità non è uniforme e continua, ma si può tagliare a «pezzi». Alla luce della teoria atomica di Dalton, le leggi di Faraday ci dicono che gli atomi nel liquido (ioni) migrano all'elettrodo, dove ogni ione riceve una quantità unitaria di elettricità che lo converte in un atomo di idrogeno, ossigeno, argento o altro. Le leggi di Faraday portano dunque a un'inevitabile conclusione: esistono delle *particelle di elettricità*. Questa conclusione, tuttavia, doveva attendere circa sessant'anni prima di trovare, alla fine del secolo, una spettacolare conferma nella scoperta dell'elettrone.

Uno shock a Copenaghen

Per continuare la storia dell'elettricità – la cosa che compare, a pagamento, nelle vostre prese elettriche – dobbiamo andare a Copenaghen, Danimarca. Nel 1820, Hans Christian Oersted fece una scoperta cruciale, secondo alcuni storici *la* scoperta cruciale. Egli creò una corrente elettrica nella maniera canonica, collegando con fili i due terminali di un congegno voltaico (batteria). L'elettricità era ancora un mistero, ma una corrente elettrica comportava una cosa, chiamata carica elettrica, che si muoveva lungo un filo. Nessuna sorpresa, dunque, finché Oersted non accostò al circuito l'ago di una bussola (un magnete). Quando la corrente fluiva, l'ago della bussola deviava dal polo nord geografico (il suo normale orientamento) per assumere una strana posizione ad angolo retto rispetto al filo. Oersted fu tormentato da questo effetto finché non gli si palesò l'idea che, dopotutto, una bussola è studiata per scoprire campi magnetici. La corrente nel filo deve dunque produrre un campo magnetico, no? Oersted aveva scoperto una connessione fra elettricità e magnetismo: *le correnti producono campi magnetici*. Anche i magneti producono, ovviamente, campi magnetici, e la loro capacità di attrarre pezzi di ferro (o di tener chiusa la porta del vostro frigorifero) era stata abbondantemente studiata. La notizia fece il giro dell'Europa e creò un enorme scalpore.

Sulla scorta di questa informazione, il parigino André-Marie Ampère scoprì una relazione matematica fra corrente e campo magnetico. La forza precisa e la direzione di questo campo dipendeva dalla corrente e dalla forma (dritta, circolare o altro) del filo che la conduceva. Grazie a una combinazione di ragionamento matematico e di molti esperimenti affannosamente effettuati, Ampère suscitò una tempesta di controversie personali dalla quale emerse, a tempo debito, una formula per calcolare il campo magnetico prodotto da una corrente elettrica mediante qualsiasi configurazione di filo, dritto, curvo, circolare o avvolto strettamente in forma cilindrica. Poiché la corrente che attraversa due fili dritti produce due campi magnetici, questi campi possono respingersi a vicenda; di fatto, i fili esercitano una forza l'uno sull'altro. Questa scoperta rese possibile a Faraday l'invenzione del motore elettrico. Un profondo significato l'aveva anche il fatto che un flusso circolare di corrente produce un campo magnetico. Poteva darsi che quelli che gli antichi chiamavano magnetiti, magneti naturali, fossero di fatto composti di correnti circolari su scala atomica? Un altro indizio della natura elettrica degli atomi.

Oersted, come molti altri scienziati, si sentiva portato all'opera di unificazione, semplificazione e riduzione. Egli pensava che gravità, elettricità e magnetismo fossero differenti manifestazioni di una singola forza, il che spiega come mai la sua scoperta di una connessione diretta fra due di queste forze riuscì così eccitante (traumatizzante?). Anche Ampère cercava la semplicità; egli tentava sostanzialmente di eliminare il magnetismo considerandolo un aspetto dell'elettricità in movimento (elettrodinamica).

Tutto déjà vu, ancora una volta

Entra in scena Michael Faraday (1791-1867). (Va bene, è già entrato, ma questa è la sua presentazione ufficiale. Fiato alle trombe, prego.) Se Faraday non fu il più grande sperimentatore del suo tempo, è senz'altro uno dei candidati al titolo. Si dice che abbia prodotto più biografie di Newton, Einstein o Marilyn Monroe. Perché? In parte per il sapore da Cenerentola della sua carriera. Nato povero, a volte addirittura ridotto alla fame (una volta gli fu dato un pezzo di pane come unico cibo per una settimana), Faraday era praticamente privo di istruzione, con una robusta formazione religiosa. Apprendista presso un rilegatore a quattordici anni, si arrangiò a leggere alcuni dei libri che rilegava. Si diede così un'educazione da autodidatta, mentre andava sviluppando un'abilità manuale che gli sarebbe servita nella sua attività di sperimentatore. Un giorno un cliente portò

una copia della terza edizione dell'Enciclopedia Britannica da rilegare. Essa conteneva una voce sull'elettricità. Faraday la lesse, ne fu preso, e il mondo cambiò.

Riflettete su questo. Due notizie vengono ricevute dai servizi giornalistici televisivi da parte delle agenzie di stampa:

FARADAY SCOPRE L'ELETTRICITÀ,
LA ROYAL SOCIETY PLAUDE ALL'EROICA IMPRESA

NAPOLEONE FUGGE DA SANT'ELENA,
GLI ESERCITI CONTINENTALI IN MARCIA

Quale delle due notizie verrà mandata in onda nel telegiornale delle sei? Giusto! Napoleone. Ma nel corso dei successivi cinquant'anni la scoperta di Faraday elettrizzò letteralmente l'Inghilterra e mise in moto un cambiamento così radicale nel modo di vivere degli abitanti del pianeta come non si è mai verificato in conseguenza delle invenzioni di un solo essere umano. Se soltanto i custodi del giornalismo televisivo fossero stati costretti a frequentare un corso di scienze all'università...

Candele, motori, dinamo

Ecco che cosa fece Michael Faraday. Avendo iniziato la carriera professionale a ventun anni come chimico, scoprì diversi composti organici, fra cui il benzene. Passò poi alla fisica, mettendo ordine nell'elettrochimica. (Se quei chimici dell'Università dello Utah che pensarono di aver scoperto la fusione fredda nel 1989 avessero capito meglio le leggi dell'elettrolisi di Faraday, forse avrebbero risparmiato una brutta figura a se stessi e a tutti noi.) Faraday continuò facendo grandi scoperte nei campi dell'elettricità e del magnetismo. Egli

- scoprì la legge (chiamata con il suo nome) di induzione elettromagnetica per cui un campo magnetico variabile crea un campo elettrico
- fu il primo a produrre una corrente elettrica da un campo magnetico
- inventò il motore elettrico e la dinamo
- dimostrò la relazione fra elettricità e legame chimico
- scoprì l'effetto del magnetismo sulla luce
- e molte altre cose!

Tutto ciò senza una laurea, un dottorato o un diploma di scuola superiore. Faraday era anche matematicamente un analfabeta. Scrisse le sue scoperte non nella forma di equazioni, ma in semplice linguaggio descrittivo, spesso accompagnato da figure per spiegare i dati.

Nel 1990 l'Università di Chicago lanciò una serie TV intitolata «Le lezioni di Natale», e io ebbi l'onore di tenere la prima lezione. La intitolai «La candela e l'universo» prendendo l'idea da Faraday, che aveva inaugurato le originarie lezioni di Natale per i bambini nel 1826. Nella prima di esse egli sostenne che tutti i processi scientifici conosciuti erano illustrati da una candela accesa. Questo era vero nel 1826, ma nel 1990 abbiamo imparato a conoscere una quantità di processi che *non* si verificano nella candela perché la temperatura è troppo bassa. Nondimeno, le lezioni di Faraday sulla candela erano lucide e divertenti, e sarebbero un grande regalo di Natale per i vostri figli se qualche attore dalla voce di velluto decidesse di farne un CD. Si aggiunga dunque un altro aspetto a questo già notevole uomo: Faraday come divulgatore.

Abbiamo già discusso le ricerche di Faraday nel campo dell'elettrolisi, che prepararono la strada alla scoperta della struttura elettrica degli atomi chimici, e quindi dell'esistenza dell'elettrone. Adesso voglio descrivere i suoi due maggiori contributi: l'induzione elettromagnetica e il suo concetto quasi mistico di «campo».

La strada che porta alla moderna comprensione dell'elettricità (più propriamente, l'elettromagnetismo o il campo elettromagnetico) assomiglia alla famosa combinazione «doppio gioco» del baseball. In questo caso, abbiamo la combinazione Oersted-Ampère-Faraday. Oersted e Ampère compirono i primi passi nello studio delle correnti elettriche e dei campi magnetici. Le correnti elettriche che scorrono in fili simili a quelli che si trovano nelle vostre case creano campi magnetici. Potete dunque creare un magnete di potenza arbitraria, da quelli più piccoli fino ai magneti giganti usati negli acceleratori di particelle, organizzando le correnti. Questa comprensione degli elettromagneti illumina la nostra comprensione dei magneti naturali in quanto contenenti elementi di corrente su scala atomica che cooperano a generare un magnete. Anche i materiali non magnetici hanno queste correnti atomiche amperiane, ma il loro orientamento casuale non produce nessun chiaro magnetismo.

Faraday si sforzò a lungo di unificare elettricità e magnetismo. Se l'elettricità può creare campi magnetici, si domandava, i magneti possono generare elettricità? Perché no? La natura ama la simme-

tria. Ma gli ci vollero più di dieci anni (1820-1831) per provarlo. Questa fu probabilmente la sua più grande scoperta.

La scoperta sperimentale di Faraday si chiama induzione elettromagnetica, e la simmetria da lui cercata emerse in una forma sorprendente. La via che porta alla fama è lastricata di buone invenzioni. Faraday si domandò, per prima cosa, se un magnete poteva far muovere un filo portatore di elettricità. Visualizzando le forze, egli costruì uno strumento consistente in un filo con un capo collegato a una batteria e l'altro sospeso dentro un recipiente di mercurio. Il filo pendeva libero in modo da potersi avvolgere intorno a un magnete di ferro nel recipiente. Quando veniva emessa la corrente, il filo si muoveva circolarmente intorno al magnete. Noi oggi conosciamo questa strana invenzione come motore elettrico. Faraday aveva trasformato l'elettricità in movimento, in grado di produrre lavoro.

Facciamo un salto nel 1831, a un'altra invenzione. Faraday arrotolò un gran numero di giri di filo di rame su uno dei lati di una matassa di ferro e collegò le due estremità del rotolo a un sensibile strumento per la misurazione della corrente chiamato galvanometro. Arrotolò un'analoga lunghezza di filo all'altro lato della matassa, collegandone le estremità a una batteria in modo che la corrente scorresse nel rotolo. Questo strumento è attualmente chiamato trasformatore. Riassumiamo. Abbiamo due rotoli sui lati opposti di una matassa. Uno, chiamiamolo A, è collegato a una batteria; l'altro (B) è collegato a un galvanometro. Che cosa succede quando viene fornita l'elettricità?

La risposta è importante per la storia della scienza. Quando la corrente scorre nel rotolo A, l'elettricità produce magnetismo. Faraday ritenne che questo magnetismo dovesse indurre una corrente nel rotolo B. Invece ottenne uno strano effetto. Quando diede corrente, l'ago del galvanometro collegato al rotolo B deflettè – voilà! l'elettricità! – ma solo per un istante. Dopo il repentino sussulto, l'ago rimase ostinatamente puntato sullo zero. Quando scollegò la batteria, l'ago deflettè brevemente nella direzione opposta. Aumentare la sensibilità del galvanometro non portava alcun risultato. Aumentare il numero di giri in ogni rotolo non portava alcun risultato. Usare una batteria molto più potente non portava alcun risultato. Ed ecco il momento dell'«eureka» (in Inghilterra si chiama il momento del «per Giove»): Faraday immaginò che la corrente nel primo rotolo avesse indotto una corrente nel secondo, ma solo quando la prima variava. Così, come avrebbero mostrato i successivi trent'anni di ricerca, un campo magnetico *variabile* genera un campo elettrico.

L'acquisizione tecnologica che emerse a suo tempo fu il generatore elettrico. Facendo ruotare meccanicamente un magnete, si può produrre un campo magnetico costantemente variabile che genererà un campo elettrico e, se lo si collega a un circuito, una corrente elettrica. Si può far girare il magnete con una manovella, usando la forza di una cascata o una turbina a vapore. Adesso siamo in grado di generare elettricità per trasformare la notte in giorno e per far arrivare energia alle prese elettriche nelle case e nelle fabbriche.

Ma noi scienziati puri... noi siamo alla ricerca dell'a-tomo e della particella di Dio; ci occupiamo della tecnologia solo perché sarebbe stato tremendamente difficile costruire acceleratori di particelle senza l'elettricità di Faraday. Quanto a Faraday, probabilmente non sarebbe stato impressionato dall'elettrificazione del mondo, tranne che per il fatto che avrebbe potuto lavorare di notte.

Faraday costruì il primo generatore elettrico azionato a mano; all'epoca fu chiamato dinamo. Ma egli era ancora troppo preso dalla «scoperta di nuovi fatti, certo che [le applicazioni pratiche] avrebbero trovato il loro pieno sviluppo in futuro», per preoccuparsi di che cosa farsene. Si racconta spesso l'aneddoto che il primo ministro inglese visitò il laboratorio di Faraday nel 1832 e, indicando la strana macchina, chiese a che cosa servisse. «Non lo so» rispose Faraday, «ma scommetto che un giorno il vostro governo ci metterà sopra una tassa.» La tassa sull'energia elettrica fu imposta in Inghilterra nel 1880.

Il campo sia con voi

Il più importante contributo *concettuale* di Faraday, di capitale importanza per la nostra storia del riduzionismo, fu il *campo*. Per introdurre questo concetto, dobbiamo tornare a Boscovich che, circa settant'anni prima dell'epoca di Faraday, aveva reso nota un'ipotesi radicale facendo fare all'a-tomo un importante passo avanti. Egli si domandò: come collidono due a-tomi? Quando delle palle da biliardo collidono, si deformano; la loro reazione elastica le spinge lontano. Ma gli a-tomi? Si può immaginare un a-tomo deformato? Che cosa lo deformerebbe? Quale sarebbe la sua reazione? Boscovich fu condotto da queste riflessioni a ridurre gli a-tomi a punti matematici privi di struttura e di dimensioni. Questi punti sono fonte delle forze, sia attrattive sia repulsive. Egli costruì un dettagliato modello geometrico che trattava le collisioni atomiche in maniera molto plausibile. Il punto a-tomo faceva tutto ciò che faceva l'«atomo duro, solido» di Newton, ma offriva dei vantaggi. Benché privo di

estensione, aveva un'inerzia (massa). L'a-tomo di Boscovich si estendeva nello spazio mediante forze che irradiavano da esso. Questo è un concetto estremamente anticipatore. Anche Faraday era convinto che gli a-tomi fossero punti, ma poiché non poteva fornirne una prova, il suo appoggio era silenzioso. La concezione di Boscovich-Faraday era la seguente: la materia consiste di punti a-tomi *circondati da forze*. Newton aveva affermato che la forza agisce sulla massa, e dunque questa era una chiara estensione della sua idea. Come si manifesta questa forza?

«Facciamo un gioco» dico agli studenti in una grande aula. «Quando lo studente alla vostra sinistra abbassa la mano, sollevate e abbassate la vostra.» Alla fine della fila passiamo il segnale alla fila immediatamente superiore e lo giriamo allo «studente alla vostra destra». Cominciamo con lo studente all'estrema sinistra della prima fila, che alza la mano. Ben presto, l'onda di «mani in alto» si muove attraverso l'aula, su, giù, e così via finché si esaurisce lentamente in fondo a essa. Ciò che abbiamo ottenuto è una perturbazione che si propaga con una certa velocità attraverso un mezzo di studenti. È lo stesso principio dell'onda che si vede negli stadi di football attraverso il campo. Un'onda d'acqua ha le stesse proprietà. Benché la perturbazione si propaghi, le particelle d'acqua stanno ferme, ballonzolando in su e in giù, ma senza essere coinvolte nella velocità orizzontale della perturbazione. La «perturbazione» è la cresta dell'onda. Il mezzo è l'acqua. La velocità dipende dalle proprietà dell'acqua. I suoni si propagano attraverso l'aria esattamente nella stessa maniera. Ma come può una forza arrivare da atomo ad atomo attraverso lo spazio vuoto che si frappone tra essi? Qui Newton si era fermato. «Non immagino ipotesi» aveva detto. Immaginata o no, l'ipotesi corrente sul modo in cui si propagava una forza era la misteriosa *azione a distanza*, una sorta di cartello segnaletico per una futura comprensione di come si pensa operi la gravità.

Faraday introdusse il concetto di *campo*, la capacità dello spazio di essere perturbato a causa di una *sorgente* situata da qualche parte. L'esempio più comune è un magnete che attrae dei chiodi di ferro. Faraday immaginò lo spazio attorno al magnete come «sollecitato» a causa della sorgente. Il concetto di campo emerse faticosamente in molti scritti nell'arco di molti anni, e gli storici si divertono a discordare su che cosa, come e quando apparve compiutamente. Questa è una nota di Faraday del 1832: «Quando un magnete agisce su un magnete lontano o su un pezzo di ferro, la causa che influisce... procede gradualmente dai corpi magnetici e *impiega tempo per la sua trasmissione* [corsivo mio]». L'idea è, dunque, che una «perturbazione» – per esempio un campo magnetico dell'intensità di 0,1 tesla – può muoversi attraverso lo spazio e informare un granello di limatura di ferro non solo del fatto che è qui, ma che può esercitare una forza. Questo è il modo in cui si comporta un'ondata con un incauto bagnante. L'onda – dell'altezza, diciamo, di un metro – ha bisogno di acqua in cui propagarsi. Dobbiamo ancora impegnarci per sapere di che cosa ha bisogno il campo magnetico. Questo più avanti.

Le linee magnetiche di forza si manifestano nel vecchio esperimento che avete fatto a scuola cospargendo di limatura di ferro un foglio di carta posto sopra un magnete. Davate un colpetto alla carta per interrompere l'attrito della superficie e la limatura di ferro si ammucchiava in uno schema definito di linee che collegano i poli del magnete. Faraday pensò che queste linee fossero manifestazioni reali del suo concetto di campo. Ciò che importa non sono tanto le ambigue descrizioni di Faraday di questa alternativa all'azione a distanza, ma il modo in cui il concetto fu modificato e usato dal nostro prossimo scienziato dell'elettricità, lo scozzese James Clerk (si pronuncia «clark») Maxwell (1831-1879).

Prima di lasciare Faraday, dovremmo chiarire il suo atteggiamento verso gli atomi. Egli ci ha lasciato due preziose citazioni del 1839:

> Anche se non sappiamo nulla di che cos'è un atomo, tuttavia non possiamo resistere a formarci un'idea di una piccola particella che ce lo rappresenta alla mente. Vi è un'immensità di fatti che giustificano la nostra credenza che gli atomi di materia siano in qualche modo associati con potenze elettriche, cui devono le loro qualità più salienti, fra le quali la loro affinità chimica [l'attrazione esercitata da un atomo su un altro atomo].

e

> Devo confessare la mia circospezione nei confronti del termine atomo perché, anche se è facilissimo parlare di atomi, è difficilissimo formarsi un'idea chiara della loro natura quando si considerano corpi composti.

Abraham Pais, citando queste frasi nel suo *Inward Bound* (Limite interno), conclude: «Questo è il vero Faraday, raffinato sperimentatore, che accetta solo ciò che è costretto ad accettare su basi sperimentali».

Alla velocità della luce

Nel primo gioco abbiamo avuto la combinazione Oersted-Ampère-Faraday, nel successivo abbiamo Faraday-Maxwell-Hertz. Anche se Faraday ha cambiato il mondo con le sue invenzioni, la sua scien-

za non poteva reggersi autonomamente e avrebbe finito per estinguersi se non fosse stato per la sintesi di Maxwell. Per Maxwell, Faraday aveva fornito un'intuizione parzialmente (cioè non matematicamente) articolata. Maxwell fu per Faraday quello che Keplero fu per Brahe. Le linee di forza magnetiche di Faraday furono un primo passo verso il concetto di campo e la sua straordinaria osservazione del 1832, che le azioni elettromagnetiche non vengono trasmesse istantaneamente ma richiedono un tempo ben definito, giocò un ruolo cruciale nella grande scoperta di Maxwell.

Egli riconosceva tutto il merito a Faraday, arrivando fino a esprimere ammirazione per il suo analfabetismo matematico che lo aveva costretto a divulgare le sue idee in un «linguaggio naturale, non tecnico». Maxwell affermò di aver avuto come motivazione fondamentale la traduzione in forma matematica della concezione dell'elettricità e del magnetismo di Faraday. Ma con il suo trattato andò molto al di là del predecessore.

Negli anni 1860-1865 gli articoli di Maxwell – modelli di densa, difficile, complessa matematica (argh!) – apparvero come il coronamento e la gloria del periodo elettrico della scienza che aveva iniziato la sua incerta storia con l'ambra e la magnetite. In questa forma finale, non solo Maxwell mise Faraday in musica matematica (per quanto atonale), ma stabilì, al tempo stesso, l'esistenza di onde elettromagnetiche che si muovevano attraverso lo spazio con una velocità finita, come aveva predetto Faraday. Questo fu un risultato importante; molti dei contemporanei di Faraday e di Maxwell pensavano che le forze venissero trasmesse istantaneamente. Maxwell specificò come avrebbe funzionato il campo di Faraday. Il suo predecessore aveva scoperto sperimentalmente che un campo magnetico variabile genera un campo elettrico. Maxwell, che si sforzava di raggiungere simmetria e coerenza nelle equazioni, postulò che un campo elettrico variabile generasse un campo magnetico. Questo produsse, nella sostanza matematica, un andirivieni di campi elettrici e magnetici che, secondo gli appunti di Maxwell, si propagano attraverso lo spazio, allontanandosi dalle loro sorgenti a una velocità che dipende da tutti i tipi di quantità elettriche e magnetiche.

Ma c'era in agguato una sorpresa, non prevista da Faraday, che rappresenta essenzialmente la scoperta più importante di Maxwell: la velocità reale di queste onde elettromagnetiche. Maxwell studiò attentamente le sue equazioni, e dopo avervi inserito i numeri sperimentali appropriati, essa risultò di 3×10^8 metri al secondo. «*Gor luv a duck!*» disse, o qualsiasi altra cosa gli scozzesi dicano quando sono

sorpresi. Perché 3×10^8 metri al secondo è la velocità della luce (che era stata misurata per la prima volta pochi anni avanti). Come abbiamo imparato con Newton e con il mistero dei due tipi di masse, ci sono poche coincidenze reali nella scienza. Maxwell concluse che la luce non è che un esempio di onda elettromagnetica. L'elettricità non è confinata ai fili, ma può diffondersi attraverso lo spazio al pari della luce. «È quasi impossibile evitare la conclusione» scrisse Maxwell «che la luce consista nelle ondulazioni trasversali dello stesso mezzo che è la causa dei fenomeni elettrici e magnetici.» Maxwell prospettò la possibilità, sfruttata poi da Heinrich Hertz, di verificare la sua teoria generando sperimentalmente onde elettromagnetiche. Fu lasciato ad altri, fra i quali Guglielmo Marconi e una miriade di inventori più recenti, di sviluppare la seconda «ondata» della tecnologia elettromagnetica: radio, radar, televisione, microonde e comunicazioni laser.

Ecco come funziona. Consideriamo un elettrone a riposo. A causa della sua carica elettrica, esiste un campo elettrico diffuso nello spazio, più intenso vicino all'elettrone, più debole via via che ce ne si allontana. Il campo elettrico «punta» verso l'elettrone. Come sappiamo che c'è un campo? Semplice: si metta da qualche parte una carica positiva e si avvertirà una forza diretta verso l'elettrone. Si costringa ora l'elettrone ad accelerare lungo un filo. Accadono due cose. Il campo elettrico cambia, non istantaneamente, ma non appena l'informazione raggiunge il punto nello spazio in cui lo stiamo misurando. Inoltre, una carica in movimento *è* una corrente, e così si è creato un campo magnetico.

Ora si applichino delle forze all'elettrone (o a molti dei suoi amici) in modo che esso vada su e giù per il filo in un ciclo regolare. La *variazione* risultante nei campi elettrico e magnetico si propaga dal filo con una velocità finita, la velocità della luce. Questa è un'onda elettromagnetica. Spesso, chiamiamo il filo antenna e la forza che guida l'elettrone un segnale di frequenza radio. Dunque, il segnale, con qualsiasi messaggio in esso contenuto, si propaga dall'antenna alla velocità della luce. Quando raggiunge un'altra antenna, trova un sacco di elettroni che esso costringerà, a sua volta, a saltellare su e giù creando una corrente oscillante che può essere rivelata e convertita in informazione audio e video.

Nonostante il suo monumentale contributo, Maxwell non fece grande scalpore. Vediamo che cosa dissero i critici del suo trattato:

– «Una concezione alquanto grossolana» (Sir Richard Glazebrook)
– «Un senso di disagio, spesso addirittura di diffidenza, si mescola all'ammirazione...» (Henri Poincaré)
– «Non trovò nessuna rispondenza in Germania e fu addirittura appena notato» (Max Planck)
– «Posso dire una sola cosa in proposito [cioè riguardo alla teoria elettromagnetica della luce]. Non la ritengo ammissibile» (Lord Kelvin).

Con recensioni del genere è difficile diventare una superstar. Ci volle uno sperimentatore per fare di Maxwell una leggenda, anche se non durante la sua vita, visto che morì con dieci anni di anticipo.

Hertz al salvataggio

Il vero eroe (per questo prevenutissimo studioso degli storici) è Heinrich Hertz che, in una serie di esperimenti che richiesero più di un decennio (1873-1888), confermò tutte le predizioni della teoria di Maxwell.

Le onde possiedono una «lunghezza d'onda», che è la distanza fra le loro creste. Le creste delle onde nell'oceano possono essere solitamente distanti cinque-dieci metri. La lunghezza d'onda delle onde sonore si aggira intorno a pochi centimetri. Anche i fenomeni elettromagnetici si presentano in forma di onde. La differenza fra diverse onde elettromagnetiche – infrarossi, microonde, raggi X, onde radio – dipende soltanto dalle loro lunghezze d'onda. La luce visibile – azzurra, verde, arancione, rossa – è nel mezzo dello spettro elettromagnetico. Le onde radio e le microonde hanno lunghezze d'onda maggiori. I raggi ultravioletti e i raggi X e gamma hanno lunghezze d'onda minori.

Usando una bobina ad alto voltaggio e un dispositivo di rivelazione, Hertz trovò un modo di generare onde elettromagnetiche e misurare la loro velocità. Egli mostrò che queste onde avevano le stesse proprietà di riflessione, rifrazione e polarizzazione delle onde luminose e che si potevano far convergere. Nonostante le recensioni negative, Maxwell aveva ragione. Hertz, nel sottoporre la teoria di Maxwell a rigorosi esperimenti, la chiarì e la semplificò traendone un «sistema di quattro equazioni» al quale arriveremo fra un momento.

Dopo Hertz, le idee di Maxwell vennero generalmente accettate, e il vecchio problema dell'azione a distanza fu mandato in soffitta. Forze in forma di campi si propagavano attraverso lo spazio a una

velocità finita, la velocità della luce. Maxwell si era reso conto che occorreva un mezzo per sostenere questi campi elettrici e magnetici, e dunque aveva adattato la nozione di Boscovich-Faraday di un etere onnipervasivo in cui vibrano i campi elettrici e magnetici. Proprio come l'etere rifiutato da Newton, questo aveva delle strane proprietà e avrebbe presto svolto un ruolo cruciale nella successiva rivoluzione scientifica.

Il trionfo di Faraday-Maxwell-Hertz segnò un ulteriore successo del riduzionismo. Le università non dovettero più assumere un professore di elettricità, uno di magnetismo e uno di ottica. Adesso questi campi erano tutti unificati, e quindi bastava una sola cattedra (più soldi per la squadra di football). Vi era incluso un vasto insieme di fenomeni, sia cose create dalla scienza sia cose naturali: motori, generatori, trasformatori e un'intera tecnologia elettrica; luce solare e stellare, radio, radar e microonde, raggi infrarossi e ultravioletti, raggi X e gamma, laser. La propagazione di tutte queste cose è spiegata dalle quattro equazioni di Maxwell che, nella loro forma moderna, applicata all'elettricità nello spazio libero, sono scritte così:

$$c\,\nabla \times E = -\,(\delta B/\delta t)$$
$$c\,\nabla \times B = (\delta E/\delta t)$$
$$\nabla \cdot B = 0$$
$$\nabla \cdot E = 0$$

In queste equazioni, E sta per il campo elettrico, B per il campo magnetico e c, la velocità della luce, sta per una combinazione di quantità elettriche e magnetiche che possono essere misurate su un tavolo di laboratorio. Si noti la simmetria di E e B. Non preoccupatevi degli scarabocchi incomprensibili; per i nostri scopi non è importante spiegare come funzionano queste equazioni. Il punto essenziale è l'ingiunzione scientifica «Sia fatta la luce!».

Gli studenti di fisica e ingegneria di tutto il mondo sfoggiano T-shirt con queste quattro agili equazioni. Le equazioni originali di Maxwell, tuttavia, non assomigliano affatto a queste. Questa versione semplificata è opera di Hertz, un raro esempio di scienziato che era qualcosa di più del solito sperimentatore con una comprensione solo operativa della teoria. Egli era eccezionale in entrambi i campi. Come Faraday, era al tempo stesso consapevole e disinteressato nei confronti dell'immensa importanza pratica del suo lavoro. Lasciò le applicazioni pratiche a menti meno scientifiche, come Guglielmo Marconi e Larry King. L'opera teorica di Hertz consistette in gran

parte nel mettere ordine in quella di Maxwell, semplificando e divulgando la sua teoria. Senza gli sforzi di Hertz, gli studenti di fisica avrebbero dovuto darsi a un'intensa attività di sollevamento pesi in modo da poter indossare T-shirt di taglia enorme per farci stare la goffa matematica di Maxwell.

Fedeli alla nostra tradizione e alla promessa fatta a Democrito, che recentemente ci ha mandato via fax un promemoria, dobbiamo intervistare Maxwell sugli atomi. Naturalmente, ci credeva. Egli era anche l'autore di una teoria di grande successo che trattava i gas come un aggregato di atomi. Maxwell credeva, giustamente, che gli atomi chimici non fossero soltanto piccolissimi corpi rigidi, ma avessero una struttura complessa. Questa convinzione gli fu suggerita dalla conoscenza degli spettri ottici che, come vedremo, divenne importante nello sviluppo della teoria dei quanti. Egli credeva, sbagliando, che questi atomi complessi fossero indivisibili. Lo affermò nel 1875 con queste eloquenti parole: «Benché nel corso delle ere si siano verificate, e possano ancora verificarsi, catastrofi nel cielo, anche se sistemi antichi possono dissolversi e sistemi nuovi evolversi dalle rovine dei precedenti, [gli atomi] di cui sono costituiti questi sistemi [Terra, sistema solare, eccetera] – le unità fondamentali dell'universo materiale – rimangono integri e inviolati». Se soltanto avesse usato i termini «quark e leptoni» invece di «atomi»!

Il giudizio definitivo su Maxwell viene ancora da Einstein, che ebbe a definirlo come lo scienziato che fornì il contributo singolo più importante del XIX secolo.

La calamita e la palla

Abbiamo sorvolato su alcuni importanti dettagli della nostra storia. Come sappiamo che i campi si propagano a una velocità fissata? Come determinarono i fisici nel XIX secolo la velocità della luce? Qual è la differenza fra l'azione a distanza istantanea e la risposta differita nel tempo?

Immaginiamo di mettere a un'estremità di un campo da football un potentissimo elettromagnete, e all'altra estremità una palla di ferro sospesa con un sottile filo a un altissimo supporto. La palla mantiene una lieve inclinazione verso il magnete lontano. Supponiamo adesso di togliere *rapidissimamente* la corrente al magnete. Precise osservazioni della palla e del suo filo registrerebbero una risposta quando la palla torna alla sua posizione di equilibrio. Ma la risposta è istantanea? Sì, dice il popolo dell'azione a distanza. Fra magnete e palla di ferro vi è una salda connessione e, quando l'effetto del magnete scompare, la palla comincia *istantaneamente* a tornare all'inclinazione zero. No! dice la gente della velocità finita. L'informazione «il magnete è spento, adesso puoi rilassarti» viaggia attraverso il campo con una velocità definita, e dunque la reazione della palla è ritardata.

Oggi conosciamo la risposta. La palla deve aspettare, non molto a lungo, perché l'informazione viaggia alla velocità della luce, ma c'è un ritardo misurabile. Ma ai tempi di Maxwell questo problema era al centro di un acceso dibattito. Era in questione la validità del concetto di campo. Perché gli scienziati non hanno risolto il dubbio con un esperimento? Perché la luce è così veloce che impiega solo un milionesimo di secondo per attraversare il campo. Nell'Ottocento, questo era un ritardo difficilmente misurabile. Oggi è un fatto banale misurare intervalli di tempo migliaia di volte più brevi, ciò che consente di valutare con facilità la propagazione finita degli eventi elettromagnetici. Per esempio, noi facciamo rimbalzare segnali laser da un nuovo riflettore sulla Luna per misurare la sua distanza dalla Terra. Il viaggio impiega circa un secondo.

Un esempio su scala più vasta: il 23 febbraio 1987, esattamente alle 7.36 ora di Greenwich, fu osservata l'esplosione di una stella nel cielo meridionale. Questo fenomeno di supernova ha avuto luogo nella Grande Nube di Magellano, un ammasso di stelle e polvere lontano 160.000 anni luce. In altri termini, l'informazione elettromagnetica ha impiegato 160.000 anni per arrivare dalla supernova alla Terra. E la supernova 87A era relativamente nelle vicinanze. L'oggetto più lontano osservato dista circa 8 miliardi di anni luce. La sua luce ha cominciato il suo viaggio verso il nostro telescopio piuttosto vicino all'Inizio.

La velocità della luce fu misurata per la prima volta in un laboratorio terrestre da Armand-Hippolyte-Louis Fizeau nel 1849. Essendo privo di oscilloscopi e di orologi a cristalli, egli usò un ingegnoso dispositivo di specchi (per estendere la lunghezza del percorso della luce) e una ruota dentata in rapida rotazione. Se sappiamo a che velocità gira la ruota e conosciamo il suo raggio, possiamo calcolare il tempo che essa impiega perché un intervallo fra due denti sia sostituito da un dente. Possiamo regolare la velocità di rotazione in modo che il tempo coincida esattamente con quello impiegato da un fascio di luce per andare dall'intervallo allo specchio e tornare all'intervallo e, attraverso di esso, alla pupilla di monsieur Fizeau. *Mon dieu! Lo vedo!* Adesso aumentiamo gradualmente la velocità della ruota (abbreviamo il tempo) finché la luce si blocca. Là. Ora co-

nosciamo la distanza percorsa dal fascio – dalla sorgente luminosa attraverso l'intervallo allo specchio e indietro al dente della ruota – e conosciamo il tempo impiegato. Trastullandosi con questo dispositivo Fizeau ottenne il famoso numero di 300 milioni (3×10^8) di metri al secondo.

Sono continuamente sorpreso della profondità filosofica di tutti tali signori, protagonisti di questo rinascimento elettromagnetico. Oersted credeva (contrariamente a Newton) che tutte le forze della natura (a quel tempo: gravità, elettricità e magnetismo) fossero differenti manifestazioni di una forza primordiale. Questo è co-o-o-sì moderno! Gli sforzi di Faraday per stabilire la simmetria di elettricità e magnetismo si rifanno all'eredità greca di semplicità e unificazione, 2 dei 137 obiettivi del Fermilab in questi anni Novanta.

È il momento di andare a casa?

In questi due ultimi capitoli abbiamo percorso più di tre secoli di fisica classica, da Galileo a Hertz. Ho lasciato fuori della brava gente. Per esempio, l'olandese Christiaan Huygens ci ha detto parecchie cose sulla luce e le onde. Il francese René Descartes, il fondatore della geometria analitica, è stato uno dei principali sostenitori dell'atomismo, e le sue teorie della materia e dell'universo furono fantasiose ma fallimentari.

Abbiamo guardato alla fisica classica da un punto di vista non ortodosso, quello della ricerca dell'a-tomo di Democrito. Di solito, l'era classica viene vista come un'indagine sulle forze: gravità ed elettromagnetismo. Come abbiamo visto, la gravitazione deriva dall'attrazione fra masse. Nel campo dell'elettricità, Faraday indicò un fenomeno diverso; secondo lui, la materia è qui irrilevante. Guardiamo ai campi di forza. Naturalmente, una volta che avete una forza dovete invocare ancora la seconda legge di Newton ($F = ma$) per trovare il movimento risultante, e qui la materia inerziale importa veramente. L'approccio di Faraday derivò dall'intuizione di Boscovich, uno dei pionieri dell'atomismo. E, naturalmente, Faraday fornì i primi accenni agli «atomi di elettricità». Forse non si riterrà giusto guardare alla storia della scienza in questo modo, come ricerca di un concetto, la particella ultima. Tuttavia, essa si nasconde qui, sotto la superficie delle vite intellettuali di molti eroi della fisica.

Nel decennio finale dell'Ottocento, i fisici pensavano di aver fatto quadrare ormai tutto. Tutta l'elettricità, tutto il magnetismo, tutta la luce, tutta la meccanica, tutte le cose in movimento, come pure la cosmologia e la gravità, tutto era stato spiegato nei termini di poche semplici equazioni. Per quanto riguardava gli atomi, la maggior parte dei chimici sentiva che l'argomento era pressoché completamente chiuso. C'era la tavola periodica degli elementi. Idrogeno, elio, carbonio, ossigeno, eccetera erano elementi indivisibili, ciascuno con il suo proprio invisibile, indivisibile atomo.

C'erano alcune misteriose incrinature nel quadro. Per esempio, il Sole rappresentava un rompicapo. Procedendo in base alle convinzioni allora correnti nel campo della chimica e della teoria atomica, lo scienziato inglese Lord Rayleigh calcolò che il Sole avrebbe dovuto bruciare tutto il suo combustibile in 30.000 anni. Gli scienziati sapevano che il Sole era in realtà un po' più vecchio. Anche la faccenda dell'etere era fonte di guai. In realtà, l'etere avrebbe dovuto avere delle proprietà meccaniche davvero bizzarre. Avrebbe dovuto essere totalmente trasparente, capace di sgusciare fra atomi di materia senza disturbarli, e tuttavia rigido come l'acciaio per sostenere l'enorme velocità della luce. Tuttavia, si sperava che questi e altri misteri sarebbero stati risolti al momento opportuno. Se avessi insegnato nel 1890, sarei stato tentato di mandare a casa i miei studenti di fisica, consigliandoli di trovarsi un argomento di studio più interessante. Tutte le grandi questioni erano state risolte. Quelle che mancavano ancora all'appello – riguardanti l'energia solare, la radioattività e diversi altri rompicapi – be', tutti sapevano che prima o poi sarebbero state sacrificate al potere del moloch teorico Newton-Maxwell. La fisica era stata definitivamente impacchettata in una scatola e legata con un nastro.

D'un tratto, alla fine del secolo, l'intero pacchetto cominciò a disfarsi. Colpevole, come al solito, fu la scienza sperimentale.

La prima vera particella

Durante il XIX secolo, i fisici si innamorarono delle scariche elettriche che si formavano in tubi di vetro riempiti di gas quando veniva abbassata la pressione. Un artigiano del vetro foggiava un delicato tubo della lunghezza di un metro. Venivano fissati nel tubo degli elettrodi metallici. Lo sperimentatore pompava via l'aria come meglio poteva, quindi immetteva il gas desiderato (idrogeno, aria, anidride carbonica) a bassa pressione. Da ogni elettrodo uscivano dei fili collegati a una batteria esterna. Venivano applicati alti voltaggi. Allora, in una stanza oscurata, gli sperimentatori rimanevano sgomenti all'apparire di splendidi bagliori che mutavano forma e

dimensioni quando diminuiva la pressione. Chiunque abbia visto un'insegna al neon conosce perfettamente questo tipo di bagliore. A una pressione sufficientemente bassa, il bagliore si trasformava in un raggio che si muoveva dal catodo, il terminale negativo, verso l'anodo. Logicamente, esso venne battezzato raggio catodico. Questi fenomeni, che attualmente sappiamo piuttosto complessi, affascinarono una generazione di fisici e interessarono i profani in tutta Europa.

Gli scienziati erano a conoscenza di alcuni controversi, e addirittura contraddittori, particolari circa questi raggi catodici. Erano dotati di una carica negativa. Si muovevano in linee rette. Potevano far girare una sottile ruota a pale fissata nel vetro. I campi elettrici *non li* deflettevano. I campi elettrici *li* deflettevano. Un campo magnetico faceva piegare un sottile fascio di raggi catodici in un arco circolare. I raggi venivano bloccati da una spessa lastra di metallo, ma potevano penetrare attraverso sottili lamine metalliche.

Fatti interessanti, ma il mistero cruciale rimaneva: che cos'erano questi raggi? Verso la fine del XIX secolo, erano state avanzate due congetture. Alcuni ricercatori pensavano che i raggi catodici fossero vibrazioni elettromagnetiche prive di massa nell'etere. Non si trattava di una cattiva congettura. Dopotutto, essi risplendevano come un fascio luminoso, un altro tipo di vibrazione elettromagnetica. E, ovviamente, l'elettricità, che è una forma di elettromagnetismo, aveva qualcosa a che vedere con questo genere di raggi.

Presero un partito diverso gli scienziati che ipotizzarono che i raggi catodici fossero una forma di materia. Una buona congettura li voleva composti di molecole dei gas contenuti nei tubi che si erano caricate elettricamente. Un'altra congettura li riteneva composti di una nuova forma di materia, piccole particelle mai isolate prima. Per una varietà di ragioni, l'idea che ci fosse un vettore fondamentale della carica elettrica era «nell'aria». Riveleremo immediatamente il segreto. I raggi catodici non erano vibrazioni elettromagnetiche né molecole di gas.

Che cosa avrebbe detto Faraday se fosse stato ancora in vita alla fine dell'Ottocento? Le leggi che da lui presero nome implicavano con forza l'esistenza di «atomi di elettricità». Come ricorderete, egli aveva effettuato alcuni esperimenti analoghi, tranne che per il fatto di far passare l'elettricità attraverso liquidi anziché gas, finendo per ottenere degli ioni, degli atomi dotati di carica elettrica. Nel 1874, George Johnstone Stoney, un fisico irlandese, aveva coniato il termine «elettrone» per l'unità di elettricità che si perde quando un atomo diventa

uno ione. Se Faraday avesse visto un raggio catodico, forse in cuor suo avrebbe saputo che stava vedendo all'opera degli elettroni.

È possibile che alcuni scienziati di questo periodo abbiano avuto più di un sospetto del fatto che i raggi catodici fossero particelle; alcuni, forse, pensarono di aver finalmente trovato l'elettrone. Come trovarlo? Come dimostrarne l'esistenza? Nell'intenso periodo che precede il 1895, molti eminenti ricercatori in Inghilterra, Scozia, Germania e Stati Uniti studiarono le scariche gassose. Quello che si imbatté nel filone giusto fu un inglese di nome J.J. Thomson. Vi furono altri che ci arrivarono vicino. Daremo uno sguardo a due di costoro, e a ciò che hanno fatto, solo per mostrare quanto sia sconfortante la vita dello scienziato.

Il tizio che ci arrivò più vicino fu Emil Weichert, un fisico prussiano, che diede dimostrazione della sua tecnica in una conferenza tenuta nel gennaio del 1887. Il suo tubo di vetro misurava circa quaranta centimetri di lunghezza e dieci di diametro. I raggi catodici illuminati erano facilmente visibili in una stanza parzialmente oscurata.

Se state cercando di catturare una particella, dovete descrivere la sua carica (e) e massa (m). A quel tempo, la particella in questione era troppo piccola per avere un peso. Per ovviare a questo inconveniente, molti ricercatori, indipendentemente l'uno dall'altro, utilizzarono una tecnica ingegnosa: sottoporre il raggio a forze elettriche e magnetiche note e misurare la sua reazione. Ricordate $F = ma$. Se i raggi fossero veramente composti di particelle cariche elettricamente, le forze subite dalle particelle varierebbero con la quantità di carica (e) di cui sono dotate. La reazione risulterebbe attenuata dalla loro massa inerziale (m). Sfortunatamente, l'effetto che era possibile misurare era il quoziente di queste due quantità, il rapporto e/m. In altri termini, i ricercatori non riuscivano a trovare dei valori individuali per e o m, ma soltanto un numero uguale a un valore diviso per l'altro. Vediamo un semplice esempio. Supponete di avere il numero 21 e che vi venga detto che esso è il quoziente di due numeri. Il 21 è solo un indizio. I due numeri che state cercando potrebbero essere 21 e 1, 63 e 3, 7 e 1/3, 210 e 10, e così via all'infinito. Ma se avete sentore di un numero, potete dedurre l'altro.

Per determinare il valore e/m, Weichert mise il suo tubo a contatto con un magnete che piegava il fascio luminoso in un arco. Il magnete respinge la carica elettrica delle particelle; più lente sono le particelle, più facile è per il magnete piegarle in un arco circolare. Una volta trovata la velocità, la deflessione delle particelle causata dal magnete gli fornì un valore abbastanza attendibile per e/m.

Egli capì allora che, se avesse avanzato una congettura ragionevole sul valore della carica elettrica, avrebbe potuto dedurre la massa approssimativa della particella. Queste furono le sue conclusioni: «Non abbiamo a che fare con atomi conosciuti in chimica, perché la massa di queste particelle [di raggio catodico] in movimento risulta da 2000 a 4000 volte più piccola dell'atomo chimico più leggero che si conosca, l'atomo di idrogeno». Weichert centrò quasi il bersaglio. Sapeva di avere a che fare con qualche nuovo tipo di particella. Era maledettamente vicino alla massa. (La massa dell'elettrone risultò poi essere 1837 volte più piccola di quella dell'idrogeno.) Perché allora Thomson è famoso e Weichert è una nota a piè di pagina? Perché si limitò ad assumere (a congetturare) il valore della carica elettrica, senza avere nessuna prova. Weichert fu anche distratto da un cambiamento di occupazione e da un interesse contrastante per la geofisica. Era uno scienziato che arrivava alla conclusione giusta, ma senza avere tutti i dati. Niente sigaro, Emil!

Il secondo in gara fu Walter Kaufmann, a Berlino. Raggiunse il traguardo nell'aprile del 1897, e il suo difetto fu l'opposto di quello di Weichert: buoni dati, cattivo ragionamento. Anch'egli derivò il valore e/m usando campi magnetici ed elettrici, ma fece fare all'esperimento un importante passo avanti. Kaufmann era soprattutto interessato alle possibili variazioni del rapporto e/m in dipendenza dalla pressione e dal gas usato nel tubo: aria, idrogeno, anidride carbonica. A differenza di Weichert, egli pensò che le particelle del raggio catodico fossero semplicemente atomi carichi del gas nel tubo, così che avrebbero dovuto avere una massa diversa per ogni gas usato. Sorpresa: egli scoprì che il valore e/m *non* variava. Si ottenevano sempre gli stessi numeri indipendentemente dal tipo di gas e dalla pressione. Kaufmann rimase sconcertato e perse il treno. Molto male, perché i suoi esperimenti erano considerevolmente eleganti. Egli ottenne una misura del rapporto e/m migliore del campione, J.J. È una delle crudeli ironie della scienza che non potesse afferrare ciò che i suoi dati gli gridavano in faccia: le tue particelle sono una nuova forma di materia, testone! E sono i costituenti universali di tutti gli atomi; ecco perché il valore e/m non varia.

Joseph John Thomson (1856-1940) esordì come fisico matematico e rimase sorpreso quando, nel 1884, fu nominato professore di fisica sperimentale nel famoso Cavendish Laboratory dell'Università di Cambridge. Sarebbe bello sapere se desiderava realmente essere uno sperimentatore. Thomson era famoso per la sua goffaggine con le apparecchiature sperimentali, ma ebbe la fortuna di avere degli ottimi assistenti che potevano eseguire i suoi ordini e tenerlo lontano da tutto quel vetro da rompere.

Nel 1896, Thomson si mise a studiare la natura del raggio catodico. A una delle estremità del suo tubo di vetro di quaranta centimetri, il catodo emette i suoi misteriosi raggi. Questi si dirigono verso un anodo provvisto di un foro che permette ad alcuni dei raggi (leggi elettroni) di attraversarlo. Il raggio ristretto così formato arriva all'estremità del tubo, dove colpisce uno schermo fluorescente producendo una macchiolina verde. La sorpresa successiva di Thomson consiste nell'inserire nel tubo di vetro una coppia di piastre lunghe circa quindici centimetri. Il fascio catodico passa attraverso il varco lasciato da queste piastrine, che sono collegate a una batteria, creando un campo elettrico perpendicolare al raggio catodico. Questa è la regione di deflessione.

Se il fascio si muove in reazione al campo, ciò significa che è dotato di una carica elettrica. D'altra parte, se i raggi catodici sono fotoni – particelle leggere – ignoreranno le piastre deflettenti e continueranno il loro percorso in linea retta. Usando una potente batteria, Thomson vede la macchiolina sullo schermo fluorescente muoversi in giù quando la piastra superiore è negativa e in su quando è positiva. Egli dimostra così che i raggi sono carichi. Incidentalmente, se le piastre deflettenti hanno un voltaggio alternato (che varia rapidamente più-meno-più-meno), la macchiolina verde si muove su e giù rapidamente, creando una linea verde. Questo è il primo passo verso la costruzione di un tubo televisivo e la visione di Dan Rathee della CBS nel telegiornale della sera.

Ma è il 1896, e Thomson ha altre cose per la mente. Poiché la forza (l'intensità del campo elettrico) è nota, è facile, usando la semplice meccanica newtoniana, calcolare di quanto dovrebbe allontanarsi la macchia *qualora* sia possibile trovare la velocità dei raggi catodici. Adesso Thomson usa un trucco. Crea attorno al tubo un campo magnetico orientato in maniera tale che la deflessione magnetica annulli esattamente quella elettrica. Poiché questa forza magnetica dipende dalla velocità, che è ignota, egli non deve fare altro che leggere l'intensità del campo elettrico e del campo magnetico per derivare un valore per la velocità. Una volta determinata la velocità, può tornare a controllare la deflessione del raggio in campi elettrici. Ciò che ne risulta è un valore preciso per e/m, il quoziente della carica elettrica di una particella di raggio catodico divisa per la sua massa.

Con meticolosa pignoleria, Thomson applica campi, misura deflessioni, cancella deflessioni, misura campi e ottiene dei numeri per

il rapporto e/m. Come Kaufmann, fa controlli su controlli variando il materiale del catodo – alluminio, platino, rame, stagno – e ripetendo l'esperimento. Tutte le prove danno lo stesso numero. Cambia il gas nel tubo: aria, idrogeno, anidride carbonica. Stesso risultato. Thomson non ripete l'errore di Kaufmann: conclude che i raggi catodici non sono molecole di gas cariche ma particelle fondamentali che devono essere una componente di tutta la materia.

Non soddisfatto di avere prove sufficienti, ne escogita delle altre usando l'idea della conservazione dell'energia. Cattura i raggi catodici in un blocco di metallo. La loro energia è nota; non è altro che l'energia elettrica conferita alle particelle dal voltaggio della batteria. Egli misura il calore generato dai raggi catodici e nota che, nel mettere in relazione l'energia acquisita dagli ipotetici elettroni con il calore generato nel blocco metallico, appare il rapporto e/m. In una lunga serie di esperimenti, Thomson ottiene un valore per e/m (2×10^{11} coulomb per chilogrammo) che non è molto diverso dalla sua prima acquisizione. Nel 1897 annuncia il risultato: «Abbiamo nei raggi catodici materia in un nuovo stato, in cui la suddivisione della materia è molto più avanzata che nel comune stato gassoso». Questa «suddivisione della materia» è un ingrediente di tutta la materia ed è parte della «sostanza di cui sono formati gli elementi chimici».

Che nome dare a questa nuova particella? Il termine di Stoney, «elettrone», era a portata di mano, e così essa diventò l'elettrone. Dall'aprile all'agosto 1897, Thomson fece conferenze e scrisse intorno alle proprietà corpuscolari dei raggi catodici. Questo si chiama commercializzare i propri risultati.

C'era ancora un enigma da sciogliere: quello riguardante i valori individuali di e e m. Thomson si trovò nello stesso pasticcio in cui si era trovato Weichert alcuni anni prima. Così, egli fece una cosa ingegnosa. Osservando che il rapporto e/m di questa nuova particella era circa mille volte maggiore di quello dell'idrogeno, il più leggero di tutti gli atomi chimici, si rese conto che o l'e dell'elettrone era molto più grande o la sua m molto più piccola. Che cosa significa grande e o piccola m? Intuitivamente, egli si sentiva portato verso m piccola, una scelta coraggiosa, dal momento che stava congetturando che questa nuova particella avesse una massa minuscola, molto minore di quella dell'idrogeno. Si ricordi che la maggior parte dei fisici e dei chimici pensavano ancora che l'atomo chimico fosse l'a-tomo indivisibile. Thomson affermò ora che il bagliore nel suo tubo era una prova dell'esistenza di un ingrediente universale, di un costituente più piccolo di tutti gli atomi chimici.

Nel 1898 Thomson si diede a misurare la carica elettrica dei suoi raggi catodici, misurando così indirettamente anche la loro massa. Egli impiegò un nuovo ritrovato tecnico, la camera a nebbia, inventata dal suo allievo scozzese C.T.R. Wilson per studiare le proprietà della pioggia, una merce tutt'altro che rara in Scozia. Piove quando il vapore acqueo si condensa intorno a minuscole particelle solide formando delle gocce. Quando l'aria è serena, gli ioni, elettricamente carichi, possono svolgere la funzione di queste particelle, ed ecco ciò che accade in una camera a nebbia. Thomson misurò la carica totale nella camera usando una tecnica elettrometrica e determinò la carica individuale di ogni gocciolina contandole e dividendo il totale.

Dovevo costruire una camera a nebbia di Wilson come parte della mia tesi di dottorato, e da allora ho odiato la tecnica, odiato Wilson, odiato chiunque avesse qualcosa a che fare con questo arnese ostinato come un mulo. Quel Thomson ottenne il valore corretto di e, e dunque una misurazione della massa dell'elettrone ha qualcosa di miracoloso. E questo non è tutto. Durante l'intera vicenda, la sua applicazione dovette essere incrollabile. Come arrivò a conoscere il campo elettrico? Lesse l'etichetta sulla batteria? Non c'erano etichette. Come arrivò a conoscere il valore preciso del suo campo magnetico per misurare la velocità? Come misurò la corrente? La lettura di una lancetta su un quadrante presenta i suoi problemi. La lancetta è un po' stupida. Può sobbalzare e sussultare. Com'è calibrata la scala? Ha un significato? Nel 1897, dei criteri assoluti erano voci non ancora in catalogo. Misurare voltaggi, correnti, temperature, pressioni, distanze, intervalli di tempo, erano tutti problemi formidabili. Ogni misurazione richiedeva una dettagliata conoscenza del funzionamento della batteria, dei magneti e degli apparecchi misuratori.

Anche allora esisteva il problema politico: come convincere le autorità a darvi le risorse per fare gli esperimenti. Essere un boss, come era Thomson, serviva parecchio. E tralascio il problema più rilevante di tutti: come decidere l'esperimento da fare. Thomson aveva il talento, le aderenze politiche e l'energia per riuscire dove altri avevano fallito. Nel 1898 annunciò che gli elettroni erano componenti dell'atomo e che i raggi catodici erano elettroni che erano stati separati dall'atomo. Gli scienziati ritenevano che l'atomo chimico fosse privo di struttura, indivisibile. Thomson lo aveva fatto a pezzi.

L'atomo era stato diviso; avevamo trovato la nostra prima particella elementare, il nostro primo a-tomo. Lo sentite quel ghigno?

V
L'atomo nudo

> C'è qualcosa che sta succedendo qua. / Che cosa sia non è affatto chiaro.
>
> BUFFALO SPRINGFIELD

La notte di San Silvestro del 1999, mentre il resto del mondo si prepara per l'ultimo botto del secolo, la comunità dei fisici, da Palo Alto a Novosibirsk, da Città del Capo a Reykjavik, si starà ancora rimettendo dai bagordi di due anni prima, quando venne celebrato il centenario (nel 1998) della scoperta dell'elettrone, la prima autentica particella elementare. I fisici vanno pazzi per le celebrazioni. Essi celebreranno il compleanno di qualsiasi particella, anche la più oscura. Ma l'elettrone, accidenti! Si ballerà per le strade.

Dopo la sua scoperta, si brindava spesso all'elettrone nel suo luogo di nascita, il Cavendish Laboratory all'Università di Cambridge, con l'augurio: «All'elettrone, che possa per sempre restare inutile!». Pia illusione. Oggi, meno di un secolo più tardi, tutta la nostra sovrastruttura tecnologica si basa su quel tipetto.

Appena nato, l'elettrone cominciò subito a dare problemi. E seguita ancor oggi. Viene «raffigurato» come una sfera elettricamente carica che ruota veloce intorno a un asse, creando così un campo magnetico. Esso diede un gran daffare a J.J. Thomson per misurarne la carica e la massa, ma oggi conosciamo queste due quantità con un alto grado di precisione.

Ma passiamo alle sue proprietà più elusive. Nel curioso mondo degli atomi, il raggio dell'elettrone si considera generalmente uguale a zero. Ciò fa sorgere alcuni ovvi problemi:

- Se il raggio è zero, che cos'è che ruota?
- Come può avere una massa?
- Dove sta la carica?
- E per prima cosa, come sappiamo che il raggio è zero?
- Posso restituire questo libro e riavere indietro i miei soldi?

Ci troviamo qui faccia a faccia con il problema di Boscovich. Egli aveva risolto la questione delle collisioni fra «atomi» facendo di essi dei punti, enti privi di dimensioni. I suoi punti erano letteralmente punti matematici, ma egli concedeva a queste particelle puntiformi di avere le proprietà convenzionali: massa e quel qualcosa che noi chiamiamo carica, l'origine di un campo di forze. I punti di Boscovich erano teorici e del tutto speculativi. Ma l'elettrone è reale. Probabilmente una particella puntiforme, ma provvista di tutte le altre proprietà. Massa, sì. Carica, sì. Rotazione, sì. Raggio, no.

Pensate al gatto del Cheshire di Lewis Carroll. Il gatto del Cheshire scompare lentamente fino a che tutto quello che rimane è il suo sorriso. Niente gatto, solo il sorriso. Immaginate il raggio di un globo di carica rotante ridursi lentamente fino a scomparire, lasciando intatta la sua rotazione, carica, massa, e sorriso.

Questo capitolo riguarda la nascita e lo sviluppo della teoria dei quanti. È la storia di ciò che accade dentro l'atomo. Comincio dall'elettrone perché una particella con rotazione e massa ma priva di dimensioni è per noi tutt'altro che intuitiva. Ragionare attorno a una cosa del genere è una vera ginnastica mentale. Potrebbe indolenzirvi un po' il cervello, perché dovrete usare certi remoti muscoli cerebrali cui forse non avete mai dovuto ricorrere troppo spesso.

Dunque, l'idea dell'elettrone come di un punto dotato di massa, carica e rotazione solleva problemi concettuali. La particella di Dio è intimamente connessa con questa difficoltà strutturale. Una vera comprensione della massa ancora ci sfugge, e l'elettrone negli anni Trenta e Quaranta fu il presagio di queste difficoltà. Misurare le dimensioni dell'elettrone divenne l'attività di moda, producendo una gran quantità di dottori di ricerca, dal New Jersey a Lahore. Nel corso degli anni, esperimenti sempre più raffinati diedero numeri sempre più piccoli, tutti compatibili con un raggio zero. È come se Dio tenesse l'elettrone nella Sua mano e lo spremesse quanto può. Con i grandi acceleratori costruiti negli anni Settanta e Ottanta, le misurazioni divennero sempre più precise. Nel 1990 il raggio è stato misurato essere *meno di* 0,000000000000000001 centimetri (ovvero, nella notazione scientifica, 10^{-18}). Questo è il miglior «zero» che la fisica possa offrire... finora. Se avessi in questo momento una buona idea per aggiungere sperimentalmente un altro zero dopo la virgola, pianterei tutto per correre a farla approvare.

Un'altra interessante proprietà dell'elettrone è il suo magnetismo,

espresso da un numero chiamato «fattore g». Usando la teoria dei quanti, il fattore g dell'elettrone si calcola essere:

$$2 \times (1,001159652190)$$

E di che calcolo si tratta! A valenti fisici teorici sono occorsi degli anni e un'impressionante quantità di tempo di calcolo su elaboratori superveloci per arrivare a questo numero. Ma questa era teoria. Per la verifica, i fisici sperimentali inventarono dei metodi ingegnosi per misurare il fattore g con altrettanta precisione. Il risultato, conseguito da Hans Dehmelt dell'Università di Washington, è stato:

$$2 \times (1,001159652193)$$

Come potete vedere, abbiamo un accordo fino quasi al dodicesimo decimale. Si tratta indubbiamente di uno spettacolare accordo fra previsione teorica e risultato sperimentale. Il punto è che il calcolo del fattore g è un prodotto della teoria dei quanti, e che al cuore di tale teoria si trova quello che è conosciuto come il principio di indeterminazione di Heisenberg. Nel 1927 un fisico tedesco propose un'idea sorprendente: che è impossibile misurare con una precisione arbitraria *sia* la velocità *sia* la posizione di una particella. Questa impossibilità è indipendente da quanto brillante sia lo sperimentatore e da quanti quattrini abbia a disposizione. Si tratta di una legge fondamentale della natura.

Eppure, a dispetto del fatto che l'incertezza sia intrecciata nel medesimo tessuto di cui è fatta la teoria dei quanti, essa produce delle previsioni, come quella del fattore g, che sono esatte fino all'undicesimo decimale. La teoria dei quanti è, *prima facie*, una rivoluzione scientifica che costituisce il terreno su cui fiorisce la scienza del XX secolo... ed è iniziata con una confessione di ignoranza.

Come si arrivò a questa teoria? È una buona storia gialla e, come in tutti i gialli che si rispettino, ci sono degli indizi, alcuni validi, altri falsi. Ci sono maggiordomi dappertutto a fuorviare gli investigatori. Gli uomini dello sceriffo e quelli dell'FBI si scontrano, discutono, cooperano, e se ne vanno ognuno dalla sua parte. Ci sono colpi di scena in continuazione. Ne darò un'immagine molto parziale, sperando tuttavia di rendere il senso dell'evolversi delle idee dal 1900 fino agli anni Trenta, quando dei rivoluzionari ormai maturi diedero gli ultimi ritocchi alla teoria. Ma attenzione! Il microcosmo non è per nulla intuitivo: masse puntiformi, cariche puntiformi e rotazioni puntiformi sono delle proprietà compatibili con i risultati sperimentali nel mondo degli atomi, ma non sono delle quantità che si possano vedere in giro nel normale macrocosmo. Se vogliamo rimanere buoni amici mentre leggerete questo capitolo, dobbiamo imparare a sopportare i disturbi mentali originati dalla nostra limitata esperienza come macrocreature. Dimenticate la normalità; aspettatevi sorprese e incredulità. Niels Bohr, uno dei padri della teoria dei quanti, ha detto che chiunque non sia stato scioccato da essa non l'ha capita. Richard Feynman ha affermato che nessuno comprende veramente la teoria dei quanti. («E allora che cosa pretende da noi?» dicono i miei studenti.) Einstein, Schrödinger e altri grandi scienziati non accettarono mai le implicazioni della teoria, eppure, negli anni Novanta, alcune delle bizzarrie quantiche vengono considerate cruciali per comprendere l'origine dell'universo.

L'arsenale intellettuale che gli esploratori portarono con sé nel nuovo mondo dell'atomo comprendeva la meccanica newtoniana e le equazioni di Maxwell. Tutti i fenomeni macroscopici sembravano essere soggetti a queste poderose sintesi. Ma gli esperimenti dell'ultima decade del secolo scorso cominciarono a causare perplessità ai teorici. Abbiamo già parlato dei raggi catodici, che portarono alla scoperta dell'elettrone. Nel 1895 Wilhelm Röntgen scoprì i raggi X. Nel 1896 Henri Becquerel scoprì accidentalmente la radioattività, mentre stava sistemando delle lastre fotografiche in alcuni classificatori vicino a dell'uranio. La radioattività condusse in breve al concetto di *durata di vita*. La radioattività decadeva in tempi caratteristici la cui lunghezza media poteva essere misurata, ma il decadimento di un particolare atomo non era prevedibile. Che cosa significava ciò? Nessuno lo sapeva. In verità, tutti quei fenomeni sfidavano la spiegazione classica.

Quando l'arcobaleno non basta

I fisici stavano anche cominciando a guardare più da vicino la luce e le sue proprietà. Newton aveva dimostrato, usando un prisma di vetro, che poteva duplicare l'arcobaleno dividendo la luce bianca nelle sue componenti spettrali, i colori che, sfumando gradualmente, vanno dal rosso a un estremo dello spettro al violetto all'altro. Nel 1815 Joseph von Fraunhofer, un abile artigiano, perfezionò considerevolmente l'artificio ottico usato per osservare i colori in uscita dal prisma. Adesso, guardando in un piccolo telescopio, i colori apparivano ottimamente a fuoco. Con questo strumento Fraunhofer fece – tombola! – una scoperta. Agli splendidi colori dello spettro

solare erano sovrapposte delle serie di sottili righe nere, spaziate fra loro in maniera apparentemente irregolare. Fraunhofer poté rilevare qualcosa come 576 di queste righe. Che cosa significava? Ai suoi tempi si credeva che la luce fosse un fenomeno ondulare. Più tardi James Clerk Maxwell avrebbe dimostrato che le onde luminose sono campi elettrici e magnetici e che un parametro cruciale è la distanza fra le creste delle onde, la lunghezza d'onda, la quale determina i colori.

Conoscendo le lunghezze d'onda possiamo assegnare una scala numerica alla banda dei colori. La luce visibile va dal profondo rosso, a 8000 ångström (0,00008 cm), al profondo violetto, a circa 4000 ångström. Usando questa scala, Fraunhofer poté collocare con precisione ciascuna delle sottili righe nere. Per esempio, una famosa di queste righe, conosciuta come H_α o «H con α» (se non vi piace «acca con alfa» chiamatela Irving), ha una lunghezza d'onda di 6562,8 ångström, nel verde, vicino al centro dello spettro.

Perché queste righe sono importanti? Perché già nel 1859 il fisico tedesco Gustav Robert Kirchhoff aveva trovato una stretta connessione fra esse e gli elementi chimici. Questo signore aveva riscaldato diversi elementi – rame, carbonio, sodio, e così via – fino a renderli incandescenti. Egli riscaldò anche diversi gas in provetta, usando apparati visivi anche più perfezionati per esaminare lo spettro luminoso emesso da questi gas incandescenti. Così scoprì che ogni elemento emetteva una serie caratteristica di righe molto sottili e dai colori brillanti sovrapposte a un fondo più scuro di colori continui. All'interno del telescopio era incisa una scala di misurazione, calibrata in lunghezze d'onda, così che la posizione di ciascuna riga brillante poteva essere rilevata. Poiché gli spazi fra le righe erano differenti per ciascun elemento, Kirchhoff e il suo complice, Robert Bunsen, furono in grado di prendere le impronte digitali degli elementi grazie alle loro *righe spettrali*. (Kirchhoff aveva bisogno di qualcuno che lo aiutasse a scaldare gli elementi, e chi meglio dell'uomo che inventò il bruciatore detto «becco di Bunsen»?) Con una certa abilità, i ricercatori potevano identificare piccole impurità di un elemento chimico mischiato a un altro. Gli scienziati possedevano adesso un metodo per esaminare la composizione di qualsiasi cosa emettesse luce, per esempio il Sole e perfino, con il tempo, le stelle più lontane. Rilevando righe spettrali prima sconosciute, vennero scoperti molti nuovi elementi. Un nuovo elemento chiamato elio venne identificato nel Sole nel 1878. Fu solamente diciassette anni più tardi che questo elemento nato dalle stelle fu scoperto sulla Terra.

Pensate all'emozione di analizzare per la prima volta la luce di una stella... e di trovarla fatta dello stesso materiale che abbiamo qui, sulla Terra! Poiché la luce delle stelle è molto debole, ci vollero grandi telescopi e molta perizia nel lavoro di analisi spettroscopica per studiarne la banda di colori e le righe, ma la conclusione fu inequivocabile: il Sole e le stelle sono fatti della stessa materia che c'è in Terra. In effetti, dobbiamo ancora trovare un elemento che esista nello spazio e che non ci sia sulla Terra. Noi siamo fatti del materiale delle stelle. Questa scoperta è chiaramente di grandissimo significato per qualsiasi idea metafisica sul mondo in cui viviamo. Essa dà ragione a Copernico: noi non siamo speciali.

Ma perché Fraunhofer, il tizio che diede origine a tutto, aveva trovato quelle righe scure nello spettro solare? La spiegazione arrivò presto. Il nucleo del Sole (bianco, al calor bianco) emetteva luce di tutte le lunghezze d'onda. Ma, come questa luce filtrava attraverso i gas relativamente più freddi della superficie solare, questi gas assorbivano la luce di quelle lunghezze d'onda che essi stessi emettevano. Così le righe scure di Fraunhofer rappresentavano l'*assorbimento*. Le righe brillanti di Kirchhoff, invece, l'*emissione*.

E così siamo arrivati al tardo Ottocento, e che cosa ce ne facciamo di tutto ciò? Un momento: gli atomi chimici erano supposti essere solidi, dotati di massa, privi di struttura, indivisibili a-tomi. Ma ciascuno di essi sembrava adesso capace di emettere o di assorbire le sue caratteristiche serie di sottili righe di energia elettromagnetica. Per qualche scienziato, questo voleva dire una cosa sola, «una struttura!». Era risaputo che gli oggetti meccanici avevano una struttura che risuonava se sottoposta a impulsi regolari. Le corde di un piano o di un violino vibrano per emettere note musicali, e i bicchieri di cristallo vibrano quando un tenore corpulento emette un do di petto. I ponti possono cominciare a vibrare violentemente sotto il passo di soldati che marciano. Le onde luminose sono proprio questo, impulsi con una «battuta» uguale alla velocità divisa per la lunghezza d'onda. Questi esempi meccanici sollevavano la questione: se gli atomi non avevano una struttura interna, come potevano dispiegare quelle proprietà di risonanza manifestate dalle righe spettrali?

E se gli atomi avevano una struttura, che cosa dicevano in proposito le teorie di Newton e di Maxwell? I raggi X, la radioattività, l'elettrone e le righe spettrali avevano una cosa in comune. Non potevano essere spiegati dalla teoria classica (sebbene molti scienziati ci abbiano provato). D'altro canto, nessuno di questi fenomeni contraddiceva apertamente la sintesi classica di Newton-Maxwell. Sem-

plicemente, essi erano inesplicabili. Ma fino a quando non fosse saltata fuori l'arma del delitto, restava la speranza che qualche furbacchione trovasse alla fin fine un modo per salvare la fisica classica. Ma questo non accadde. Invece, si trovò l'arma del delitto. Anzi, ce ne furono addirittura tre.

L'arma del delitto numero uno: la catastrofe dell'ultravioletto

La prima evidenza osservativa che apertamente contraddicesse la teoria classica fu la cosiddetta «radiazione del corpo nero». Tutti gli oggetti irradiano energia. Più sono caldi, più ne irradiano. Un essere umano vivo emette circa 200 watt di infrarossi, nella banda invisibile dello spettro. (I fisici teorici emettono 210 watt e i politici arrivano a 250.)

Tutti gli oggetti assorbono del pari energia dal loro ambiente. Se la loro temperatura è più alta di quella esterna, essi si raffreddano perché irradiano più energia di quanta ne assorbano. «Corpo nero» è il termine tecnico per un assorbente ideale, un oggetto che assorba il 100% della radiazione che lo colpisce. Un tale oggetto, quando è freddo, appare nero perché non riflette la luce. I fisici sperimentali amano usare un corpo nero come standard per misurare l'emissione radioattiva. Ciò che è interessante circa la radiazione emessa da un tale corpo – un pezzo di carbone, un ferro di cavallo, la resistenza di un tostapane – è lo spettro della luce: quanta luce emana alle diverse lunghezze d'onda. Quando riscaldiamo uno di questi oggetti, i nostri occhi percepiscono un'incandescenza rosso opaco prima, rosso brillante poi, (quando diventa più caldo), poi giallo, poi blu e bianco, e infine (molto caldo) bianco brillante. Perché si finisce con il bianco?

Lo spostamento dello spettro significa che il picco d'intensità della luce si sta muovendo, man mano che la temperatura aumenta, dall'infrarosso al rosso al giallo al blu. Come il picco si muove, la luce si distribuisce più ampiamente fra le lunghezze d'onda. Quando il picco è sul blu, anche gli altri colori sono così irradiati che il corpo caldo appare ai nostri occhi bianco. Al calor bianco, diciamo. Gli astrofisici stanno oggi studiando la radiazione di corpo nero prodotta dalla più incandescente irradiazione nella storia dell'universo, il Big Bang.

Ma sto divagando. Tornando a bomba, nei tardi anni Novanta del secolo scorso, i dati sulla radiazione del corpo nero si accumulavano sempre più precisi. Che cosa diceva la teoria di Maxwell a proposito di questi dati? Un disastro! Era tutto sbagliato. La teoria classica prediceva una forma sbagliata per la curva di distribuzione dell'intensità della luce fra i vari colori, le varie lunghezze d'onda. In particolare, essa prediceva che il picco di luce sarebbe sempre stato emesso sulle lunghezze minori, verso la banda viola dello spettro e perfino nell'invisibile ultravioletto. E questo non era ciò che succedeva. Da qui la «catastrofe dell'ultravioletto», ed ecco l'arma del delitto.

All'inizio si credette che a questo fiasco delle equazioni di Maxwell si sarebbe ovviato tramite una miglior comprensione di come l'energia elettromagnetica fosse generata dalla materia radiante. Il primo fisico a rendersi conto del vero significato di questo fallimento fu Albert Einstein nel 1905, ma la scena fu preparata per il primattore da un altro scienziato.

Entra sul palcoscenico Max Planck, un fisico teorico di Berlino sulla quarantina, il quale aveva già alle spalle una lunga carriera in fisica ed era un esperto nella teoria termodinamica. Era intelligente, e aveva un'aria molto professorale. Una volta che gli capitò di dimenticare in quale aula doveva far lezione, ed era entrato nella segreteria del dipartimento per chiedere «Per favore, potreste dirmi in quale aula il professor Planck fa lezione oggi?», si sentì rispondere: «Non andateci, giovanotto. Siete troppo giovane per capire qualcosa delle lezioni del nostro dotto professor Planck».

In ogni caso, Planck aveva un occhio di riguardo per i risultati sperimentali, molti dei quali ottenuti dai colleghi del suo laboratorio berlinese, ed era ben deciso a comprenderli. Così egli ipotizzò un'espressione matematica che sarebbe andata d'accordo con i dati. Non solo essa si accordava con la distribuzione dell'intensità della luce a una data temperatura, ma anche con il modo in cui la curva (la distribuzione delle lunghezze d'onda) mutava con il cambiamento della temperatura. È importante fin d'ora sottolineare che una data curva permette di calcolare la temperatura del corpo che emette la radiazione. Planck faceva bene a essere orgoglioso. «Oggi ho fatto una scoperta importante quanto quella di Newton» si vantò con il figlio.

Il problema successivo di Planck era quello di collegare la sua ispirata ipotesi con qualche legge di natura. I corpi neri, così dicevano i dati senza ombra di dubbio, emettevano una radiazione molto debole sulle lunghezze minori. Quale «legge di natura» poteva imporsi a quelle lunghezze minori predilette dalla teoria di Maxwell? Pochi mesi dopo aver pubblicato la sua fortunata equazione, Planck si imbatté in una possibilità. Il calore è una forma d'energia, e quindi il contenuto energetico del corpo radiante è limitato dalla sua temperatura. Più caldo è l'oggetto, maggiore l'energia disponibile. Nella

teoria classica, questa energia è distribuita uniformemente fra le diverse lunghezze d'onda. *Ma* (un po' d'attenzione, che diamine, stiamo per scoprire la teoria dei quanti) supponiamo che l'ammontare d'energia dipenda dalla lunghezza d'onda. Supponiamo che lunghezze minori «costino» più energia. Allora, quando cerchiamo di irradiare questo genere di lunghezze, esauriamo rapidamente l'energia disponibile.

Planck trovò che per giustificare la sua formula (oggi conosciuta come la legge della radiazione di Planck) egli doveva fare due assunzioni esplicite. La prima era che l'energia irradiata dipende dalla lunghezza d'onda della luce, la seconda che questo fenomeno è intrinsecamente discontinuo. Planck poteva giustificare la sua formula e vivere in pace con le leggi della termodinamica assumendo che la radiazione venisse emessa in fasci discreti o «pacchetti» d'energia ovvero (e qui ci siamo) «quanti». Ciascun fascio d'energia è legato alla frequenza da una semplice relazione: $E = hf$. Un quanto d'energia E è uguale alla frequenza, f, della luce moltiplicata per una costante, h. Dal momento che la frequenza è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda, le lunghezze minori (ovvero le alte frequenze) costano più energia. A ogni data temperatura, solamente una certa quantità d'energia è disponibile, e così le alte frequenze sono interdette. Questo carattere discreto dell'energia era essenziale per avere la risposta giusta. La frequenza è pari alla velocità della luce divisa per la lunghezza d'onda.

La costante che Planck introdusse, h, era determinata dai dati sperimentali. Ma che cos'è h? Planck la chiamò «quanto di azione», ma la storia l'ha battezzata «costante di Planck», e da allora in avanti essa simbolizzerà la nuova, rivoluzionaria fisica. La costante di Planck ha un valore numerico, per quello che serve, che è $4{,}11 \times 10^{-15}$ eV s. Non dovete memorizzarlo. Notate solo che è un numero molto piccolo, grazie a quel 10^{-15} (15 cifre dopo la virgola).

Questo è il punto di svolta – l'introduzione della nozione di quanto o fascio d'energia luminosa – sebbene né Planck né i suoi colleghi comprendessero fino in fondo l'importanza della scoperta. L'eccezione fu Einstein, che riconobbe il vero significato dei quanti di Planck, ma per il resto della comunità scientifica ci vollero venticinque anni per arrivarci. La teoria di Planck era motivo di turbamento per il suo stesso scopritore; egli non voleva distruggere la fisica classica. «Dobbiamo rassegnarci a convivere con la teoria quantistica» ammise alla fine. «E credetemi, si espanderà. Non si fermerà all'ottica. Toccherà tutti i campi.» Come aveva ragione!

A mo' di commento finale, dovete sapere che nel 1990 il satellite COBE (*Cosmic Background Explorer*) trasmise agli estasiati astrofisici che l'avevano lanciato i dati sulla distribuzione spettrale della radiazione cosmica di fondo che pervade tutto lo spazio. I dati, precisi come mai si erano potuti ottenere prima, erano in perfetto accordo con la formula di Planck per la radiazione del corpo nero. Ricordate che la curva della distribuzione dell'intensità della luce permette di calcolare la temperatura del corpo che emette la radiazione. Usando i dati del COBE e l'equazione di Planck, i ricercatori sono stati in grado di calcolare la temperatura media dell'universo. E, ragazzi, fa proprio freddo quaggiù: 2,73 gradi sopra lo zero assoluto.

L'arma del delitto numero due: l'effetto fotoelettrico

Adesso saltiamo ad Albert Einstein, un impiegatuccio dell'Ufficio svizzero dei brevetti a Berna. L'anno è il 1905. Einstein aveva ottenuto il suo dottorato in fisica nel 1903 e passato l'anno seguente a meditare sul mondo in generale e il significato della vita. Ma il 1905 fu un buon anno per lui. Egli riuscì a risolvere tre dei principali problemi della fisica del tempo: l'effetto fotoelettrico (il nostro argomento), la teoria del moto browniano (tenetela per dopo) e... ah sì, dimenticavo, la teoria della relatività speciale. Einstein comprese che l'ipotesi di Planck significava che la luce, energia elettromagnetica, veniva emessa in forma di globi discreti, hf, invece che come le onde classiche, con una lunghezza d'onda continuamente e dolcemente cangiante in un'altra.

Questa intuizione deve aver dato a Einstein l'idea di spiegare un'osservazione sperimentale fatta da Heinrich Hertz mentre era impegnato a generare onde radio per verificare la teoria di Maxwell. Hertz realizzava ciò facendo scaturire delle scintille fra due palle metalliche. Nel corso del suo esperimento aveva notato che, se le due palle erano state pulite di recente, le scintille passavano più rapidamente attraverso lo spazio che le divideva. Per questo aveva sospettato che la pulitura permettesse alla carica elettrica di lasciare la superficie. Essendo una persona curiosa, dedicò un po' di tempo allo studio degli effetti della luce sulle superfici metalliche. Notò così che la luce blu-violetta della scintilla era essenziale nell'attirare le cariche dalla superficie metallica. Queste cariche alimentavano il ciclo contribuendo alla formazione delle scintille. Hertz pensò che la pulitura rimuovesse l'ossidazione, che ostacola l'interazione della luce con una superficie metallica.

La luce blu-violetta stimolava gli elettroni a uscire dal metallo, il che all'epoca sembrò un effetto piuttosto bizzarro. Vennero condotti sistematicamente altri esperimenti, e alla fine risultarono i seguenti fatti curiosi:

1. La luce rossa è incapace di rilasciare elettroni, anche quando è straordinariamente intensa.
2. La luce violetta rilascia facilmente elettroni, anche se relativamente fioca.
3. Minore è la lunghezza d'onda (più violetta la luce), più alta è l'energia degli elettroni rilasciati.

Einstein comprese che l'idea di Planck che la luce appare in fasci poteva essere la chiave per spiegare il mistero dell'effetto fotoelettrico. Immaginate un elettrone che sta facendosi i fatti suoi nel metallo di una delle ben pulite sfere di Hertz. Che genere di luce può dare a quell'elettrone abbastanza energia per saltare fuori dalla superficie? Einstein, usando l'equazione di Planck, notò che se la lunghezza d'onda della luce è abbastanza ridotta, l'elettrone riceve abbastanza energia per far breccia nella superficie del metallo e scappare. O l'elettrone si pappa tutto intero il fascio d'energia oppure no, ragionava Einstein. Ora, se la lunghezza d'onda del fascio pappato è troppo ampia (non abbastanza energetica), l'elettrone non può scappare; non ha abbastanza energia. Colpire il metallo con fasci d'energia luminosa poco potente (lunghezze d'onda maggiori) non serve. Einstein affermò che ciò che conta è l'energia del fascio, e non quanti fasci si hanno.

L'idea di Einstein funziona perfettamente. Nell'effetto fotoelettrico i quanti di luce, o *fotoni*, sono assorbiti invece che emessi, come nella teoria di Planck. Ambedue i processi sembrano richiedere quanti d'energia $E = hf$. La teoria quantistica guadagnava terreno. L'idea del fotone non venne provata in maniera del tutto convincente fino al 1923, quando il fisico americano Arthur Compton riuscì a dimostrare che un fotone può collidere con un elettrone proprio come fanno due palle da biliardo, cambiando direzione, energia e momento e comportandosi in ogni senso come una particella, una particella molto speciale tuttavia, in qualche modo relazionata con una frequenza vibratoria o lunghezza d'onda.

E qui riappariva un antico fantasma. La natura della luce era un vecchio *casus belli*. Ricorderete che Newton e Galileo sostenevano che la luce consistesse di «corpuscoli». Il fisico olandese Christiaan Huygens argomentava in favore di una teoria ondulatoria. Questa storica battaglia fra i corpuscoli di Newton e le onde di Huygens era stata decisa a favore delle onde all'inizio del XIX secolo dall'esperimento della doppia fessura di Thomas Young (che vedremo presto). La teoria dei quanti aveva risuscitato i corpuscoli, sotto forma di fotoni, e il dilemma onde-corpuscoli, ma per trovare un sorprendente finale.

Ma c'erano ancora altri guai in vista per la fisica classica, grazie a Ernest Rutherford e alla sua scoperta del nucleo.

L'arma del delitto numero tre: a chi piace il pane con le uvette?

Ernest Rutherford è uno di quei personaggi troppo belli per essere veri, e che sembrano mandati nella comunità scientifica da un qualche arcano sceneggiatore. Un grosso, burbero neozelandese con dei mustacchi da tricheco, Rutherford fu il primo studente straniero ammesso al famoso Cavendish Laboratory, diretto a quel tempo da J.J. Thomson. Era arrivato giusto in tempo per assistere alla scoperta dell'elettrone. Con le sue manone d'oro (a differenza del suo capo, J.J.) egli era il re dei fisici sperimentali, in gara con Faraday per essere il migliore di tutti i tempi. Era noto per la sua ferma convinzione che tirar moccoli durante un esperimento contribuiva alla sua riuscita, una convinzione del resto confortata dai risultati sperimentali, se non dalla teoria. Nel dare un giudizio su Rutherford bisogna anche considerare quei suoi studenti e ricercatori i quali, sotto il suo sguardo minaccioso, condussero importanti esperimenti. Ce ne furono parecchi: fra tutti, Charles D. Ellis (scopritore del decadimento dei raggi beta), James Chadwick (scopritore del neutrone) e Hans Geiger (quello del famoso contatore). Non pensate che sia facile seguire qualcosa come cinquanta dottorandi. Per cominciare, uno deve leggere i loro scritti. Sentite come cominciava la tesi di uno dei miei migliori studenti: «Questo campo della fisica è così vergine che nessuna pupilla umana ha mai messo piede in esso». Ma torniamo a Ernest.

Rutherford aveva un malcelato disprezzo per i fisici teorici, anche se, come vedrete, non era malaccio come teorico nemmeno lui. E fu una buona cosa che all'inizio del secolo non ci fosse la copertura giornalistica della scienza che c'è oggi. Rutherford era una tal miniera di citazioni che avrebbe fatto man bassa di tutti i fondi di ricerca. Questi sono alcuni dei suoi detti celebri.

«Che io non becchi nessuno a parlare di universo nel mio dipartimento.»

«Oh, quella roba [la relatività]. Nel nostro lavoro non ci badiamo.»
«Quando si fa scienza, o si fa fisica o si collezionano francobolli.»
«Stavo leggendo qualcuno dei miei primi lavori, sapete, e quando ho finito mi son detto: "Rutherford, ragazzo mio, tu eri un tipo maledettamente sveglio".»

Questo tipo maledettamente sveglio lavorò con Thomson, quindi attraversò l'oceano per lavorare all'Università McGill a Montréal, per poi tornare indietro in Inghilterra per occupare un posto all'Università di Manchester. Nel 1908 aveva già vinto un premio Nobel per i suoi studi sulla radioattività. Quello sarebbe stato un degno culmine di carriera per molti, ma non per Rutherford. Adesso cominciava il lavoro serio.

Non si può parlare di Rutherford senza parlare del Cavendish Lab, creato nel 1874 per essere il laboratorio di ricerca dell'Università di Cambridge. Il primo direttore fu Maxwell (un teorico come direttore di laboratorio?). Il secondo fu Lord Rayleigh, seguito nel 1884 da Thomson. Rutherford arrivò dalle remote regioni della Nuova Zelanda come borsista nel 1895, in un periodo incandescente per la ricerca. La fortuna è uno dei segreti più importanti per avere successo nella ricerca scientifica. Senza quella, conviene lasciar perdere. Rutherford ebbe fortuna. Il suo lavoro sulla radioattività appena scoperta – i raggi Becquerel, come erano chiamati – gli spalancò la strada per la più importante scoperta, il nucleo atomico, nel 1911. La fece all'Università di Manchester, e poi tornò in trionfo al Cavendish, dove succedette a Thomson come direttore.

Ricorderete che Thomson aveva seriamente ingarbugliato la faccenda della materia scoprendo l'elettrone. L'atomo chimico, che si pensava essere la particella indivisibile inventata da Democrito, aveva adesso dei piccoli aggeggi che si muovevano al suo interno. Questi elettroni avevano una carica negativa, il che costituiva un problema. La materia è neutra, né positiva né negativa. E allora, che cosa controbilancia gli elettroni?

Questa emozionante storia comincia piuttosto prosaicamente. Il capo entra nel laboratorio. Ci sono un ricercatore, Hans Geiger, e il suo schiavetto, un laureando di nome Ernest Marsden. Sono occupati in esperimenti di dispersione di particelle alfa. Una fonte radioattiva – per esempio il radon 222 – emette spontaneamente particelle alfa. Le particelle alfa, come Rutherford aveva scoperto nel 1908, non sono altro che atomi di elio senza i loro elettroni, cioè nuclei di elio. Il radon è messo in una cassa di piombo con un piccolo foro che dirige le particelle alfa su un frammento di foglia d'oro estremamente sottile. Quando le particelle passano attraverso la foglia, vengono deviate dagli atomi dell'oro. Gli angoli di queste deviazioni sono l'oggetto di studio. Rutherford aveva messo in piedi quello che sarebbe diventato il prototipo degli esperimenti di dispersione. Si sparano delle particelle verso un bersaglio e si vede dove vanno a sbattere. In questo caso le particelle alfa erano delle piccole sonde usate per scoprire la struttura atomica. La foglia d'oro che fa da bersaglio è circondata tutt'attorno – per 360 gradi – da schermi di solfuro di zinco. Quando una molecola di solfuro di zinco è colpita da una particella alfa emette un lampo di luce, che permette all'osservatore di misurare l'angolo di deviazione. La particella alfa entra nella foglia d'oro, urta un atomo, ed è deviata in uno degli schermi di solfuro di zinco. Flash! La maggior parte delle particelle subiscono una deviazione minima e colpiscono lo schermo di solfuro di zinco direttamente dietro la foglia d'oro. Era un esperimento molto impegnativo. Non esisteva ancora il contatore di particelle – Geiger non l'aveva ancora inventato – e Geiger e Marsden erano costretti a sedere in una camera buia per diverse ore per abituare i loro occhi a vedere gli impercettibili lampi. Dopodiché, il loro compito era di catalogarne numero e posizione.

Rutherford, che non doveva star seduto in camere buie perché era il capo, disse: «Vedete un po' se qualcuna delle particelle alfa viene *riflessa* dalla foglia». In altre parole, disse di controllare se qualcuna delle particelle colpisse la foglia d'oro e rimbalzasse indietro, verso la fonte. Marsden ricordò più tardi: «Con mia sorpresa fui in grado di vedere l'effetto... e lo dissi a Rutherford quando lo incontrai più tardi, sulla porta della sua stanza».

I dati pubblicati in seguito da Geiger e Marsden riportavano che una particella alfa su 8000 veniva riflessa dalla foglia metallica. Celebre il commento di Rutherford a questa notizia: «Fu forse la cosa più incredibile mai capitata in vita mia. Era come se voi sparaste un proiettile d'artiglieria da quaranta centimetri contro un pezzo di carta e quello tornasse indietro e vi colpisse».

Questo succedeva nel maggio 1909. Agli inizi del 1911 Rutherford, nei panni ora di un fisico teorico, prese di petto il problema e gratificò i suoi studenti di un ampio sorriso: «Ora so che aspetto ha l'atomo e posso spiegare l'effetto-rimbalzo». Nel maggio di quell'anno usciva il suo articolo che annunciava l'esistenza dell'atomo nucleare. La scoperta segnava la fine di un'era. L'atomo chimico veniva ora visto, correttamente, come qualcosa di complesso, non semplice, e divisibile,

per nulla... a-tomico. Incominciava una nuova era, l'era della fisica nucleare, e la fisica classica finiva in soffitta, almeno per quanto riguardava l'interno dell'atomo.

Rutherford rimuginò almeno diciotto mesi attorno a un problema che adesso risolve uno studente del primo anno di fisica. Perché era così perplesso di fronte al rimbalzare delle particelle alfa? La risposta ha a che fare con il modo in cui gli scienziati dell'epoca vedevano l'atomo. Abbiamo una massiccia particella alfa, carica positivamente, che si scaglia contro un atomo d'oro e rimbalza indietro. L'opinione corrente nel 1909 era che la particella avrebbe dovuto passare come un proiettile di cannone attraverso un foglio di carta, per usare la metafora di Rutherford.

Il modello tradizionale dell'atomo risaliva a Newton, il quale aveva affermato che le forze devono elidersi a vicenda per avere la stabilità meccanica. Perciò le forze elettriche di attrazione e repulsione dovevano bilanciarsi all'interno di un atomo di cui ci si poteva fidare ciecamente. I fisici teorici in quel volgere di secolo si erano dati con gran foga a costruire modelli dell'atomo che dovevano rendere compatibili gli elettroni con un atomo stabile. Si sapeva che gli atomi avevano un sacco di elettroni carichi negativamente. Perciò essi dovevano avere una pari quantità di carica positiva distribuita in qualche modo sconosciuto. Dal momento che gli elettroni sono molto leggeri e l'atomo è pesante, o un atomo deve avere centinaia di elettroni (per compensare il peso) oppure il peso deve risiedere nella carica positiva. Dei vari modelli proposti, il più popolare nel 1905 era quello di J.J. Thomson, mister Elettrone in persona. Era chiamato il modello del pane con le uvette perché aveva la carica positiva diffusa in una sfera che inglobava l'intero atomo, e gli elettroni erano sparsi dentro di essa come le uvette nel pane. Un tale affare sembrava essere meccanicamente stabile e permetteva anche agli elettroni di vibrare attorno alle posizioni d'equilibrio. Ma la natura della carica positiva restava un totale mistero.

Rutherford, invece, calcolò che l'unica configurazione capace di far rimbalzare una particella alfa dovesse avere l'intera massa e carica positiva concentrate in un volume molto piccolo, al centro di una sfera relativamente grande (delle dimensioni dell'atomo). Il nucleo! Gli elettroni si sarebbero trovati sparsi nella sfera. Con il tempo e con dati sperimentali migliori, la teoria di Rutherford venne raffinata. La carica positiva centrale (il nucleo) occupa un volume non più ampio di un trilionesimo del volume dell'atomo. Secondo il modello di Rutherford, la materia è prevalentemente spazio vuoto. Quando solleviamo una tavola, essa dà una sensazione di solidità, ma è il gioco reciproco delle forze elettriche (e delle regole quantiche) fra atomi e molecole ciò che crea l'illusione della solidità. L'atomo è in gran parte vuoto. Aristotele sarebbe sgomento.

La sorpresa di Rutherford davanti al fenomeno del rimbalzo delle particelle alfa può essere forse meglio apprezzata se abbandoniamo i suoi proiettili d'artiglieria e pensiamo invece a una palla da bowling che corre verso il gruppo dei birilli. Immaginatevi lo stupore della giocatrice se la palla venisse fermata dai birilli e rimandata indietro a gran velocità verso la lanciatrice, la quale dovrebbe adesso scappare a gambe levate. Potrebbe accadere? Ebbene, supponete che in mezzo agli altri birilli ci sia uno speciale «birillone» fatto di iridio massiccio, il metallo più denso che si conosca. Il birillone sarebbe pesante, accidenti se lo sarebbe! Cinquanta volte più della palla. Una sequenza al rallentatore mostrerebbe la palla che urta il birillone e lo deforma, fermandosi. Poi, man mano che il birillo riprende la sua forma originale e, in effetti, rincula anche un pochino, imprime una forza straordinaria alla palla che inverte la direzione della sua velocità. Questo è ciò che succede in qualsiasi collisione elastica, come quella di una palla contro il bordo del tavolo da biliardo. La più pittoresca metafora militare di Rutherford traeva la sua origine dal preconcetto, che condivideva con la maggioranza dei fisici suoi contemporanei, che l'atomo fosse una voluminosa sfera di soffice pasta di pane con le uvette. In un atomo d'oro, questa «enorme» sfera aveva un raggio di 10^{-9} metri.

Per rendere l'idea dell'atomo di Rutherford, se ci figuriamo il nucleo con le dimensioni di un pisello (circa mezzo centimetro di diametro) l'atomo risulterebbe una sfera di cento metri di raggio, qualcosa capace di contenere sei campi da football accostati a formare all'incirca un quadrato. Anche qui Rutherford ebbe una bella fortuna dalla sua. La sua fonte radioattiva produceva particelle alfa con una carica d'energia di circa 5 milioni di elettronvolt (lo scriviamo 5 MeV), che era quella ideale per scoprire i nuclei. Quest'energia era abbastanza bassa per far sì che la particella non arrivasse troppo vicina al nucleo, ma venisse respinta dalla sua forte carica positiva. La nube di elettroni circostante aveva troppo poca massa per esercitare un effetto apprezzabile sulla particella. Se le particelle alfa avessero avuto molta più energia, sarebbero penetrate nel nucleo, e l'incontro con la forza nucleare forte (ne parleremo più tardi) ne avrebbe complicato assai lo schema di dispersione. (La grande maggioranza delle particelle alfa passano attraverso l'atomo a tale distanza dal nu-

cleo che le loro deviazioni sono impercettibili.) Come che fosse, lo schema di dispersione delle particelle alfa misurato da Geiger e Marsden, e in seguito da una schiera di concorrenti sul continente, era matematicamente equivalente a quello che ci si sarebbe dovuto aspettare se il nucleo fosse un punto. Adesso noi sappiamo che i nuclei non sono punti, ma se le particelle alfa non ci passano troppo vicine, il risultato non cambia.

Boscovich sarebbe stato contento; gli esperimenti di Manchester sostenevano la sua ipotesi. Il risultato di una collisione è determinato dai campi di forze attorno ai «punti». L'esperimento di Rutherford aveva delle implicazioni che andavano oltre la scoperta del nucleo. Esso stabiliva che delle deviazioni molto grandi implicano l'esistenza di piccole concentrazioni di materia «puntiformi», un'idea cruciale che gli sperimentatori avrebbero ancora usato andando alla ricerca dei quark, i veri punti. Lungo il percorso del lento emergere dell'idea della struttura atomica, il modello di Rutherford fu veramente una pietra miliare. Assomigliava molto a un sistema solare in miniatura: un nucleo centrale denso e carico positivamente con un certo numero di elettroni in orbite diverse e tali che la carica negativa totale bilanciasse esattamente la carica positiva del nucleo. Il dovuto omaggio a Maxwell e a Newton non mancava. Gli elettroni orbitanti, come i pianeti, obbedivano al primo comandamento di Newton, $F = ma$. Adesso, F era la forza elettrica (legge di Coulomb) fra particelle cariche. Dal momento che anche in questo caso la forza varia inversamente al quadrato della distanza, come la gravità, si dovrebbe dedurre, almeno a prima vista, che gli elettroni abbiano delle orbite stabili come i pianeti. Ed eccolo qua, il caro, buon vecchio modello dell'atomo chimico a immagine del sistema solare. Tutto era in ordine.

Tutto era in ordine, fino all'arrivo a Manchester di un giovane fisico danese della parrocchia dei teorici. «Il mio nome è Bohr, Niels Henrik David Bohr, professor Rutherford. Sono un giovane fisico teorico e sono qui per darvi una mano.» Possiamo immaginare la reazione del burbero e ruvido neozelandese.

La lotta

La rivoluzione permanente nota come teoria dei quanti non nacque già adulta dalle teste dei fisici. Essa venne lentamente indotta dai dati che via via emergevano sull'atomo chimico. Si può considerare la lotta per capire questo atomo come un allenamento per il bello che sarebbe venuto dopo, la comprensione del subatomico, la giungla subnucleare.

Questo lento dispiegarsi della realtà probabilmente è una fortuna. Che cosa avrebbero fatto Galileo o Newton se fossero venuti a conoscenza di tutta la massa di dati prodotta dal Fermilab? Un mio collega all'Università della Columbia, un professore molto giovane, molto brillante, chiaro nell'esposizione, entusiasta, ricevette un incarico d'insegnamento veramente unico. Prendere le quaranta matricole che avevano scelto di laurearsi in fisica e tenere loro due anni di corsi intensivi: un professore, quaranta aspiranti fisici, due anni. L'esperimento fu un disastro. La maggior parte degli studenti passò ad altre discipline. Uno di loro, che si laureò in matematica, diede più tardi la spiegazione: «Mel era grande, il miglior insegnante che abbia avuto. In quei due anni non ci propinò le solite cose – la meccanica newtoniana, l'ottica, l'elettricità, e così via – ma ci aprì una finestra sul mondo della fisica moderna, dandoci un'idea dei problemi che stava affrontando nelle sue ricerche. Allora ebbi la sensazione che non c'era possibilità che avrei mai potuto maneggiare un insieme di problemi di tale difficoltà, e così passai a matematica».

C'è una questione più profonda: se il cervello umano sarà mai pronto per i misteri della fisica dei quanti, che negli anni Novanta del XX secolo continua a turbare il sonno di alcuni dei migliori fisici. Heinz Pagels (morto tragicamente pochi anni fa in un incidente di montagna) aveva avanzato l'ipotesi, nel suo bel libro *Il codice cosmico*, che il cervello umano possa non essersi evoluto abbastanza per capire il mondo dei quanti. Forse ha ragione, anche se certi suoi colleghi sembrano convinti di essersi evoluti molto più del resto di noi.

Ciò che pare indiscutibile è che la teoria dei quanti, quella raffinata teoria dei quanti che dominerà gli anni Novanta, funziona. Funziona per gli atomi. Funziona per le molecole. Funziona nei solidi complessi, nei metalli, negli isolanti, nei semiconduttori, nei superconduttori e dovunque sia stata applicata. Il successo della teoria dei quanti sta alla base di una significativa frazione del prodotto totale lordo del mondo industriale. Ma, cosa per noi più importante, è il solo strumento che abbiamo per entrare nel nucleo, nei suoi costituenti e più giù, nel vasto e minuscolo mondo della materia primordiale, dove incontreremo l'a-tomo e la particella di Dio. Ed è qui che le difficoltà concettuali della teoria dei quanti, liquidate dalla maggioranza dei fisici come mera «filosofia», possono giocare un ruolo significativo.

Bohr: sulle ali di una farfalla

La scoperta di Rutherford, arrivando dopo diversi risultati sperimentali che contraddicevano la fisica classica, fu la goccia che fece traboccare il vaso. Questo sarebbe stato un buon momento per porre la tipica questione della continua gara fra esperimento e teoria: «Noi sperimentali dobbiamo piangere in cinese, prima che voi teorici vi convinciate che c'è bisogno di qualcosa di nuovo?». Ma sembra che Rutherford non avesse idea del putiferio che il suo atomo stava per scatenare sul capo della fisica classica.

E allora arrivò Niels Bohr, che avrebbe fatto con Rutherford quello che Maxwell fece con Faraday, e Keplero con Brahe. In Inghilterra Bohr era venuto per lavorare con il grande J.J. a Cambridge, ma il venticinquenne cominciò a irritare il maestro trovando degli errori nel suo libro. Mentre studiava al Cavendish Lab con una borsa di studio della birra Carlsberg, nientemeno, Bohr assistette a una conferenza di Rutherford sul nuovo modello di atomo, nell'autunno del 1911. La tesi di laurea di Bohr era uno studio degli elettroni «liberi» nei metalli, ed egli era consapevole che c'era qualcosa che non andava nella fisica classica. Naturalmente era al corrente dell'ipotesi di Planck e dell'ancora più vistosa deviazione dall'ortodossia classica impressa da Einstein. Le righe spettrali emesse da certi elementi quando venivano riscaldati erano un'altra chiave per arrivare alla natura quantistica dell'atomo. Bohr restò così impressionato dalla conferenza di Rutherford, e dal suo atomo, che organizzò un soggiorno di quattro mesi a Manchester per il 1912.

Bohr vide le vere conseguenze del modello. Per soddisfare le equazioni di Maxwell, gli elettroni posti in orbite circolari intorno a un nucleo centrale avrebbero dovuto irradiare energia, proprio come un elettrone che va su e giù lungo un'antenna. E per soddisfare le leggi della conservazione dell'energia, le orbite avrebbero dovuto contrarsi fino a ridursi a una spirale dentro il nucleo. Se tutte queste condizioni fossero state soddisfatte, la materia sarebbe stata instabile. Il modello era un disastro dal punto di vista classico! Eppure non c'erano alternative.

Bohr non aveva altra scelta che provare qualcosa di completamente nuovo. L'atomo più semplice di tutti è quello dell'idrogeno. Così egli studiò i dati disponibili, come per esempio quante particelle alfa deceleravano nel gas di idrogeno, e arrivò alla conclusione che l'idrogeno ha un solo elettrone orbitante intorno a un nucleo carico positivamente. Bohr venne incoraggiato a rompere con la teoria

classica anche da altri fatterelli curiosi. Egli notò che nella fisica classica il raggio dell'orbita dell'elettrone nell'atomo di idrogeno resta indeterminato. Questo non rappresentava un problema per l'originale del modello, il sistema solare. Infatti, secondo le leggi di Newton, qualsiasi orbita planetaria è lecita; l'importante è che abbia origine nel modo appropriato. Una volta che il raggio sia fissato, la velocità orbitale del pianeta e il suo periodo (l'anno) sono anch'essi determinati. Ma, a quanto sembrerebbe, tutti gli atomi di idrogeno sono esattamente uguali. L'atomo non offre la varietà di orbite che esibisce il sistema solare. Bohr fece la ragionevole ma assolutamente anticlassica ipotesi che solo certe orbite siano permesse negli atomi.

Avanzò anche l'ipotesi che in queste orbite molto speciali l'elettrone *non* irradiasse. Questa, nel suo contesto storico, era una congettura incredibilmente audace. Maxwell si rivoltava nella tomba, ma Bohr cercava solamente di dare un senso ai fatti. E un fatto importante riguardava quelle righe spettrali che Kirchhoff aveva trovato anni prima. L'idrogeno riscaldato, come altri elementi, emette una serie distintiva di righe spettrali. Per ottenere queste righe, Bohr si rese conto che doveva lasciare all'elettrone l'opzione di un certo numero di orbite differenti, corrispondenti a diversi livelli energetici. Perciò assegnò all'elettrone dell'idrogeno un insieme di possibili raggi, corrispondenti a un insieme di livelli d'energia sempre più alti. Per spiegare le righe spettrali, postulò (buttandola lì) l'idea che la radiazione venga emessa quando un elettrone «salta» da un livello energetico a un altro più basso; l'energia del fotone radiante corrisponde alla differenza fra i due livelli energetici. Propose poi una regola assolutamente scandalosa per questi raggi speciali che determinano i livelli energetici. Egli affermò che sono permesse quelle orbite nelle quali il momento angolare, una ben nota quantità che misura la forza che l'elettrone possiede in virtù della sua rotazione, assume come suoi valori solo numeri interi, quando misurato in una nuova unità quantica. L'unità quantica di Bohr non era altro che la costante h di Planck. Bohr ebbe occasione di dire in seguito che «il cercare di usare le preesistenti idee quantistiche era nell'aria».

Che cosa stava facendo Bohr a tarda sera, nella sua soffitta di Manchester, con un blocco di fogli bianchi, una matita, un coltello affilato, un regolo e qualche libro? Stava cercando le regole della natura, regole che corrispondessero ai fatti elencati nei suoi manuali. Che diritto aveva di prescrivere regole per il comportamento di invisibili elettroni orbitanti intorno a invisibili nuclei atomici dell'idrogeno? Il suo diritto si fondava in ultima analisi sul suo successo nello spiegare i dati.

Egli parte dall'atomo più semplice, l'idrogeno. Sa che le sue regole devono basarsi su qualche principio ancor più fondamentale, ma prima le regole. È così che lavora il fisico teorico. Bohr a Manchester, nelle parole di Einstein, stava cercando di conoscere la mente di Dio.

Bohr ritornò presto a Copenaghen per permettere alla sua ancora germinale idea di sbocciare. Finalmente, in tre articoli pubblicati in aprile, giugno e agosto del 1913 (la grande trilogia), egli presentò la sua teoria quantistica dell'atomo di idrogeno, una mistura di leggi classiche e di ipotesi totalmente arbitrarie, chiaramente *finalizzate a ottenere la risposta giusta*. Il suo modello atomico era manipolato in modo tale da poter spiegare le righe spettrali note. Le tavole di queste righe, una serie di numeri, erano state faticosamente compilate dai seguaci di Kirchhoff e di Bunsen, e controllate a Strasburgo e a Göttingen, a Londra e a Milano. Di che genere di numeri si trattava? Eccone un esempio per l'idrogeno: $\lambda_1 = 4100,4$, $\lambda_2 = 4339$, $\lambda_3 = 4858,5$, $\lambda_4 = 6560,6$. (Scusate, come dite? No, non preoccupatevi. Non dovete memorizzarli.) Da dove arrivano queste vibrazioni spettrali? E perché solo queste, non importa quanto energizzato sia l'idrogeno? Sorprendentemente, Bohr in seguito minimizzò l'importanza delle righe spettrali: «Si pensa che lo spettro sia meraviglioso. Ma non si possono fare progressi in questo campo. È come le ali di una farfalla: certamente sono molto regolari con i loro colori e così via. Ma nessuno pensa che i fondamenti della biologia si possano ricavare dai colori delle ali di una farfalla». Eppure una chiave cruciale venne offerta proprio dalle righe dello spettro dell'idrogeno, le ali della farfalla.

La teoria di Bohr era fatta su misura per dare i numeri dell'idrogeno che si trovavano sui libri. Nella sua analisi il concetto essenziale era quello di *energia*, un termine che era stato definito precisamente ai tempi di Newton, e poi si era evoluto e ampliato. La sua comprensione è necessaria a una persona di buona cultura. Per questo dedicheremo due minuti all'energia.

Due minuti dedicati all'energia

Nella fisica delle superiori, un oggetto con una certa massa e una certa velocità si dice possedere energia cinetica (energia in virtù del moto). Gli oggetti possiedono energia anche in virtù del luogo in cui sono. Una palla d'acciaio in cima alla Sears Tower possiede energia potenziale perché qualcuno ha lavorato duro per portarla fin lassù. Se la buttate giù, cadendo essa muterà la sua energia potenziale in energia cinetica.

La sola cosa che rende l'energia interessante è che essa si conserva. Immaginate un complesso sistema di miliardi di atomi di gas che si muovono tutti rapidamente, urtando contro le pareti del contenitore e fra di loro. Qualche atomo acquisterà energia; qualcun altro la perderà. Ma l'energia totale non cambia mai. Fu solo nel XVIII secolo che gli scienziati capirono che il calore è una forma d'energia. Le sostanze chimiche possono rilasciare energia tramite reazioni come la combustione del carbone. L'energia può cambiare, e continuamente cambia, forma. Oggi conosciamo l'energia meccanica, termica, chimica, elettrica e nucleare. Sappiamo che la massa può convertirsi in energia tramite la formula $E = mc^2$. Nonostante tutte queste complicazioni, siamo ancora convinti al cento per cento che in reazioni complesse l'energia totale (inclusa la massa) resta sempre costante. Esempio: spingete un blocco di pietra su di un piano levigato. Si fermerà. La sua energia cinetica si è trasformata in calore nel piano adesso leggermente più caldo. Altro esempio: fate il pieno di benzina, e sapete che avete comprato quarantacinque litri d'energia chimica (misurata in joule), che potete usare per dare alla vostra Toyota una certa energia cinetica. La benzina si consuma, ma la sua energia no, essa si tramuta in cinquecento chilometri, da Newark a North Hero. L'energia si conserva. Ancora un esempio: una cascata d'acqua cade sul rotore di un generatore elettrico, che converte l'energia potenziale naturale in energia elettrica per illuminare e riscaldare una lontana città. Nel libro mastro della natura tutto si annota. Si vende solo ciò che si compra.

E allora?

Va bene, che cosa c'entra questo con l'atomo? Nell'ipotesi di Bohr l'elettrone doveva restare confinato in orbite particolari, ciascuna definita dal suo raggio. Ognuno di questi raggi permessi corrispondeva a un ben definito stato (o livello) d'energia dell'atomo. Il raggio minore corrispondeva all'energia più bassa, chiamata stato fondamentale. Se immettiamo energia in un campione di idrogeno allo stato gassoso, parte di essa scuoterà un poco gli atomi, così che si muoveranno più velocemente. Un'altra parte, invece, sarà assorbita dall'elettrone in una fascia specifica (ricordate l'effetto fotoelettrico), che permetterà a esso di raggiungere un altro dei suoi livelli d'energia, ovvero un'orbita con un altro raggio. I livelli sono numerati, 1, 2, 3, 4, ..., e ciascuno ha la sua energia, E_1, E_2, E_3, E_4, e così via. Bohr costruì la sua teoria in modo da includere l'idea di Einstein secondo cui l'energia di un fotone determina la sua lunghezza d'onda.

Se fotoni di tutte le lunghezze d'onda piovono su di un atomo di idrogeno, l'elettrone si mangerà il fotone appropriato (fascio di luce di una certa energia) e salterà da E_1 a, diciamo, E_2 o E_3. In questo modo gli elettroni vanno a popolare i livelli d'energia più alti dell'atomo. Questo è ciò che succede, per esempio, in un tubo a scarica. Quando vi entra l'energia elettrica, il tubo si accende dei colori caratteristici dell'idrogeno. L'energia induce alcuni elettroni dei miliardi di atomi a saltare a livelli energetici più alti. Se la corrente d'energia elettrica è abbastanza forte, gli elettroni di molti atomi si troveranno a occupare tutti i possibili stati di alta energia.

Nella rappresentazione di Bohr gli elettroni che si trovano nei livelli più alti saltano spontaneamente ai livelli più bassi. Ora ricordate la nostra breve lezione sulla conservazione dell'energia. Se gli elettroni saltano verso il basso, perdono energia, e quell'energia deve finire da qualche parte. «Nessun problema» dice Bohr. Un elettrone che «salta giù» emette un fotone d'energia uguale alla differenza fra le energie delle orbite. Se l'elettrone salta dal livello 4 al livello 2, per esempio, l'energia del fotone è uguale a E_4 meno E_2. Ci sono un sacco di salti possibili, per esempio $E_2 \rightarrow E_1$, $E_3 \rightarrow E_1$ o $E_4 \rightarrow E_1$. Sono permessi anche salti multipli, come $E_4 \rightarrow E_2$ e poi $E_2 \rightarrow E_1$. Ogni cambio d'energia risulta nell'emissione della lunghezza d'onda corrispondente, e si osserverà una serie di righe spettrali.

La spiegazione dell'atomo data da Bohr era una dannatissima spiegazione *ad hoc*, ma era un'esibizione da virtuoso, anche se non ortodossa e semiclassica. Egli usava Newton e Maxwell quando gli conveniva, altrimenti li metteva da parte. Usava Planck e Einstein fintanto che funzionavano. Era scandaloso. Ma Bohr era un tipo sveglio, e sgamò la risposta esatta.

Riassumiamo. Grazie al lavoro di Fraunhofer e di Kirchhoff nel XIX secolo, si conoscevano le righe spettrali. Si sapeva che gli atomi (e le molecole) emettono e assorbono radiazioni su specifiche lunghezze d'onda e che ciascun atomo ha il suo caratteristico schema di lunghezze d'onda. Grazie a Planck, si sapeva che la luce viene emessa in quanti. Grazie a Hertz e a Einstein, si sapeva che è anche assorbita in quanti. Grazie a Thomson, si sapeva che ci sono gli elettroni. Grazie a Rutherford, si sapeva che l'atomo ha un nucleo denso, con un sacco di vuoto dentro, e gli elettroni sparsi tutt'intorno. Grazie a mia madre e a mio padre, ho imparato tutta questa roba. Bohr mise insieme tutti questi dati e altro ancora. Agli elettroni sono permesse solo certe orbite, disse. Essi assorbono energia in quanti, che li obbliga a saltare su orbite più alte. Quando ritornano a orbite più basse, emettono fotoni, ovvero quanti di luce. Gli scienziati osservano questi quanti sotto forma di particolari lunghezze d'onda, le righe spettrali specifiche di ogni elemento.

Si è soliti riferirsi alla teoria di Bohr, sviluppata fra il 1913 e il 1925, come alla «vecchia teoria dei quanti». Planck, Einstein e Bohr avevano ciascuno fatto un passo oltre la fisica classica. Tutti avevano dei solidi dati sperimentali che davano loro ragione. La teoria di Planck andava meravigliosamente d'accordo con lo spettro del corpo nero, quella di Einstein con precise misurazioni dei fotoelettroni. Nella formula matematica di Bohr compaiono delle quantità come la carica e la massa dell'elettrone, la costante di Planck, qualche π, numeri come 3, e un importante numero intero (il numero quantico) che si riferisce ai livelli energetici. Tutti questi numeri messi insieme fornivano una formula con la quale calcolare tutte le righe spettrali dell'idrogeno. E questi calcoli si dimostrarono in considerevole accordo con i dati sperimentali.

A Rutherford la teoria di Bohr piaceva, ma egli sollevò la questione di quando e come l'elettrone decida di saltare da uno stato all'altro, una cosa che Bohr non aveva preso in considerazione. Rutherford si ricordava di un precedente analogo problema: quando un atomo radioattivo decide di decadere? Nella fisica classica ogni azione ha una causa. Nel dominio atomico questo genere di causalità sembra non comparire. Bohr riconobbe l'esistenza del problema (che non venne realmente risolto fino al lavoro di Einstein del 1916 sulle «transizioni spontanee») e propose una direzione di ricerca. Ma intanto gli sperimentali, sempre esplorando i fenomeni del mondo atomico, avevano trovato un certo numero di cose che nella teoria di Bohr non c'erano.

Quando il fisico americano Albert Michelson, un fanatico della precisione, esaminò più da vicino le righe spettrali, notò che ciascuna delle righe dell'idrogeno era in realtà composta da due righe, due lunghezze d'onda molto ravvicinate. Questo raddoppio delle righe significa che quando un elettrone è pronto a saltar giù, può scegliere fra due livelli energetici più bassi. Il modello di Bohr non prevedeva il raddoppio, che venne chiamato «struttura fine». Arnold Sommerfeld, un compagno di Bohr nelle sue ricerche, notò che la velocità degli elettroni negli atomi di idrogeno è una frazione significativa della velocità della luce e perciò andava trattata in accordo con la teoria einsteiniana della relatività ristretta del 1905. Egli fece così il primo passo per congiungere le due rivoluzioni, la teoria dei quanti e la relatività. Quando tenne conto degli effetti relativistici, poté con-

statare che là dove la teoria di Bohr prevedeva una sola orbita, la nuova teoria ne prevedeva due, assai ravvicinate. Questo spiegava il raddoppio delle righe. Nel fare i calcoli, Sommerfeld introdusse una «nuova abbreviazione» di alcune costanti che apparivano di frequente nelle sue equazioni. Si trattava di $2\pi e^2/hc$, che egli abbreviò con la lettera greca alfa (α). Non preoccupatevi dell'equazione. La cosa che ci interessa è questa: quando si inseriscono i numeri conosciuti per la carica dell'elettrone, e, la costante di Planck, h, e la velocità della luce, c, viene fuori $\alpha = 1/137$. Ancora quel 137, un numero puro.

Gli sperimentatori continuarono ad aggiungere tasselli al modello atomico di Bohr. Nel 1896, prima della scoperta dell'elettrone, l'olandese Pieter Zeeman aveva messo un becco di Bunsen fra i due poli di un potente magnete e un pugno di sale da tavola nel fornello, esaminando la luce gialla emanata dal sodio con uno spettrometro molto preciso che aveva costruito con le sue mani. E aveva osservato che, nel campo magnetico, le righe gialle diventano più larghe, il che significa che il campo magnetico divide le righe. Questo effetto venne confermato da misurazioni più accurate condotte nel 1925, quando due fisici olandesi, Samuel Goudsmit e George Uhlenbeck, avanzarono il bizzarro suggerimento che l'effetto poteva spiegarsi solamente attribuendo agli elettroni la proprietà dello *spin*. In un oggetto classico, per esempio un coperchio, lo spin è la rotazione del coperchio intorno al suo asse di simmetria. Lo spin dell'elettrone è l'analogo quantistico. Tutte queste nuove idee, sebbene di per sé valide, non stavano molto bene nel modello di Bohr del 1913. Con questi rimaneggiamenti, la teoria di Bohr sembrava adesso una vecchia Ford rimessa a nuovo con aria condizionata, cerchioni in lega aerodinamici e alettoni finti. Certo, conciato così, il modello poteva render conto di un'impressionante quantità di dati sperimentali, precisi e brillantemente ottenuti.

C'era soltanto un piccolo problema. Era sbagliato.

Un'occhiata sotto il velo

Quella sorta di trapunta fatta di pezze cucite insieme che era la teoria di Bohr stava incappando in sempre maggiori difficoltà quando, nel 1924, un dottorando francese trovò il filo del gomitolo. Questo filo, apparso in una fonte poco probabile, nell'ampollosa prosa di una dissertazione dottorale, avrebbe condotto, nel volgere di tre soli drammatici anni, a una concezione della realtà del microcosmo totalmente nuova. Il dottorando parigino era un giovane aristocratico, il principe Louis de Broglie. Egli si ispirò a un lavoro di Einstein, il quale nel 1909 aveva meditato sul significato dei suoi quanti di luce. Come poteva la luce comportarsi come uno sciame di fasci d'energia – cioè come particelle – e al tempo stesso esibire tutti i comportamenti delle onde, come l'interferenza, la diffrazione e le altre proprietà che reclamano una lunghezza d'onda?

De Broglie pensò che questo curioso carattere duale della luce fosse una proprietà fondamentale della natura che poteva risultare valida anche per oggetti materiali come gli elettroni. Nella sua teoria fotoelettrica, Einstein, seguendo Planck, aveva assegnato una certa energia a un quanto di luce, dipendente dalla sua lunghezza d'onda o frequenza. De Broglie fece allora appello a un'altra simmetria: se le onde possono essere particelle, allora le particelle (gli elettroni) possono essere onde. Egli trovò un modo per assegnare agli elettroni una lunghezza d'onda relazionata alla loro energia. La sua idea colpì nel segno immediatamente quando l'applicò agli elettroni dell'atomo di idrogeno. L'assegnazione di una lunghezza d'onda forniva una spiegazione per quella regola di Bohr misteriosa, e *ad hoc*, per la quale solo certi raggi erano consentiti all'elettrone. È ovvio, no? Come no! Se in un'orbita di Bohr l'elettrone ha una lunghezza d'onda di una frazione di centimetro compresa fra 1/13 e 1/19, allora sono permesse solo quelle orbite nelle quali può stare un numero intero di lunghezze d'onda. Provate a visualizzarlo alla buona in questo modo. Prendete un nichelino e una manciata di centesimi. Mettete il nichelino (il nucleo) sul tavolo e provate a sistemare i centesimi in circolo (l'orbita dell'elettrone) attorno al nichelino. Troverete che ci vogliono sette centesimi per fare la più piccola orbita. Questo definisce un raggio. Se volete usare otto centesimi, sarete obbligati a fare un circolo più grande, ma non un *qualsiasi* circolo più grande; ci sarà solamente *un* raggio che permette di porre otto centesimi in circolo. Raggi più grandi permetteranno nove, dieci, undici o più centesimi. Come potete vedere da questo sciocco esempio, se vi limitate a centesimi interi – o lunghezze d'onda intere – solamente certi raggi sono ammessi. Per ottenere altri circoli intermedi occorre sovrapporre i centesimi e, se essi rappresentano lunghezze d'onda, in tal modo le onde non si succedono l'una all'altra combaciando perfettamente. L'idea di de Broglie era che la lunghezza d'onda dell'elettrone (il diametro della monetina) determina il raggio ammesso. Centrale per questo concetto era l'idea di assegnare lunghezze d'onda all'elettrone.

Nella sua tesi di dottorato, de Broglie si chiedeva se l'elettrone dimostrasse altri effetti tipici dell'onda, come l'interferenza e la diffrazione. I suoi professori all'Università di Parigi rimasero assai perplessi davanti alla nozione di particelle-onda, sebbene fossero impressionati dal virtuosismo teorico del giovane principe. Uno dei suoi esaminatori, volendo avere un'opinione esterna, inviò una copia del lavoro a Einstein, il quale rispose mandando i suoi complimenti a de Broglie: «Ha sollevato un lembo del grande velo». La sua tesi di dottorato venne accettata nel 1924, e alla fine gli guadagnò un premio Nobel, facendo di de Broglie l'unico fisico, fino a quel tempo, ad aver vinto il Nobel con una tesi. Il grande vincitore fu però Erwin Schrödinger, colui che intravide tutto il potenziale insito nel lavoro di de Broglie.

Adesso arriva un interessante *pas de deux* di teoria ed esperimento. L'idea di de Broglie non aveva supporto sperimentale. Un elettrone-onda? Che significa? Il necessario sostegno apparve nel 1927, fra tutti i posti possibili, in New Jersey, non l'isola della Manica ma uno stato americano dalle parti di Newark. I Bell Telephone Laboratories, il famoso istituto industriale di ricerca, erano impegnati in uno studio dei tubi a vuoto, un vecchio marchingegno elettronico usato prima dell'alba della civiltà e dell'invenzione dei transistor. Due scienziati, Clinton Davisson e Lester Germer, stavano bombardando delle superfici metalliche ossidate con dei fasci di elettroni. Germer, lavorando sotto la direzione di Davisson, notò che un curioso gruppo di elettroni era riflesso da certe superfici metalliche non ossidate.

Nel 1926 Davisson andò a una conferenza in Inghilterra e venne a conoscenza dell'idea di de Broglie. Si affrettò a tornare ai Bell Labs e cominciò ad analizzare i suoi dati dal punto di vista del comportamento ondulare. Il modello che aveva osservato si adattava molto bene alla teoria secondo cui gli elettroni si comportano come onde, con lunghezza d'onda rapportata alla loro energia. Lui e Germer si precipitarono a pubblicare la scoperta. Non avevano troppa fretta. George P. Thomson, figlio del famoso J.J., stava effettuando una ricerca analoga al Cavendish Laboratory. Davisson e Thomson si divisero il Nobel nel 1938 per aver osservato per primi le onde di elettroni.

Detto fra parentesi, l'affetto filiale di G.P. per J.J. è ampiamente documentato nella loro calorosa corrispondenza. In una delle sue lettere più affettuose, così G.P. si lasciava trasportare dai sentimenti:

Caro padre,
Dato un triangolo sferico con lati ABC...
[E, dopo tre fitte pagine dello stesso tenore]

Tuo figlio George

E così un'onda è associata a un elettrone che sia imprigionato in un atomo oppure stia viaggiando in un tubo a vuoto. E adesso?

L'uomo che non sapeva che cos'è una batteria

Se Rutherford era il prototipo del fisico sperimentale, Werner Heisenberg (1901-1976) potrebbe essere quello del fisico teorico. Egli avrebbe soddisfatto la definizione, data da I.I. Rabi, del fisico teorico come di uno che «non saprebbe allacciarsi le scarpe». Heisenberg, uno dei più brillanti studenti europei, quasi veniva bocciato agli orali del suo esame di dottorato all'Università di Monaco, perché era caduto in antipatia a uno degli esaminatori, Wilhelm Wien, un pioniere degli studi sulla radiazione del corpo nero. Wien cominciò a fargli domandine molto pratiche, su come funziona, per esempio, una batteria. Heisenberg non ne aveva la minima idea. Wien, dopo averlo rosolato a fuoco lento con altre domande di carattere sperimentale, avrebbe voluto stroncarlo. Alla fine prevalsero più miti consigli, e Heisenberg se la cavò con l'equivalente di una generosa sufficienza.

Suo padre era professore di greco a Monaco, e da ragazzo Heisenberg aveva letto il *Timeo*, che comprende tutta la teoria atomica di Platone. Egli pensava che Platone fosse un demente – i suoi «atomi» erano piccoli cubi e piramidi – ma rimase affascinato dalla fondamentale convinzione platonica che non si possa veramente comprendere l'universo fino a che i più piccoli componenti della materia non siano conosciuti. Il giovane Heisenberg decise così di dedicare la sua vita allo studio delle più piccole particelle della materia.

Lavorò duro nel cercare di farsi un'immagine mentale dell'atomo di Rutherford-Bohr, ma non arrivò a nulla. Gli elettroni orbitanti di Bohr erano qualcosa che proprio non riusciva a immaginare. Quel piccolo atomo tanto carino che sarebbe diventato per tanti anni il simbolo della Commissione per l'energia atomica – un nucleo con degli elettroni orbitanti intorno – non aveva senso. Heisenberg si convinse che le orbite di Bohr erano mere costruzioni mentali che servivano a far tornare i calcoli e a rispondere alle obiezioni classiche, o meglio, ad aggirarle astutamente. Ma orbite «reali»? No. La teoria dei quanti di Bohr non si era liberata a sufficienza della zavor-

ra della fisica classica. Quel modo unico in cui lo spazio all'interno dell'atomo permetteva solo certe orbite reclamava una più radicale definizione. Heisenberg arrivò a comprendere che di questo nuovo atomo non poteva darsi un modello visuale. Al posto della ricerca dell'analogia visiva egli si diede un nuovo e saldo principio guida: non si deve avere a che fare con niente che non sia misurabile. Le orbite non possono essere misurate. Le righe spettrali, invece, *possono* esserlo. Heisenberg formulò una teoria chiamata «meccanica matriciale», basata su formule matematiche chiamate matrici. I suoi metodi erano matematicamente sofisticati e ancora più difficile era visualizzarli, ma era chiaro che egli aveva fatto un grande passo avanti rispetto alla vecchia teoria di Bohr. Con il tempo, la meccanica matriciale ripeté tutti i successi della teoria di Bohr facendo però a meno di quei «magici» raggi. Le matrici di Heisenberg ottennero anche dei nuovi successi, là dove la vecchia teoria aveva fatto fiasco. Ma i fisici trovavano le matrici dure da usare.

E allora qualcuno si prese la più famosa vacanza nella storia della fisica.

Le onde di materia e la signora nella villa

Pochi mesi dopo che Heisenberg aveva formulato la sua meccanica matriciale, Erwin Schrödinger decise che aveva bisogno di una vacanza. Mancavano dieci giorni al Natale del 1925. Schrödinger era un bravo ma non particolarmente famoso professore di fisica dell'Università di Zurigo, e tutti i professori universitari si meritano delle vacanze a Natale. Ma questa non era la solita vacanza. Schrödinger affittò una villa nelle Alpi svizzere per due settimane e mezzo e lasciò la moglie a casa, dicendole che andava a isolarsi per lavorare in pace al salvataggio di quel pasticcio che era la teoria dei quanti. Se ne partì con i suoi appunti, due tappi per le orecchie e un'antica fidanzata dei bei tempi della sua gioventù a Vienna. Arrivato alla villa, mise i tappi alle orecchie e la signora a letto. Aveva ciò che gli serviva per occupare il tempo libero: creare una nuova teoria *e* non far annoiare la signora. Fortunatamente, era all'altezza della bisogna. (Non diventate fisici a meno che non siate pronti a far fronte a tali compiti.)

Schrödinger aveva cominciato la sua carriera come fisico sperimentale, ma era passato alla teoria piuttosto presto. Era vecchio per essere un teorico, trentotto quel Natale. Ovviamente, ci sono un sacco di fisici teorici di mezza età, e anche anzianotti. Ma in genere essi

danno il meglio, intellettualmente parlando, fra i venti e i trenta, e dopo la trentina diventano dei «senatori» della fisica. Questo fenomeno fu specialmente vero durante gli albori della fisica quantistica, che videro Paul Dirac, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli e Niels Bohr produrre tutti le loro migliori teorie quando erano molto giovani. Pensate che quando Dirac e Heisenberg andarono a Stoccolma per ricevere il Nobel erano accompagnati dalle loro mamme. Dirac una volta compose una poesiola:

> L'età è di certo una grave infermità
> Ch'ogni fisico deve fuggir come il peccato.
> Meglio morir che viver come un baccalà
> Quando dei trenta la fatal soglia ha ormai varcato.

(Dirac vinse il Nobel per la fisica, non per la letteratura.) Fortunatamente per la scienza, Dirac non prese i suoi versi alla lettera e passò felicemente gli ottanta.

Fra le cose che Schrödinger si era portato in vacanza, c'era il saggio di de Broglie sulle particelle e le onde. Lavorando febbrilmente, egli estese ulteriormente l'idea quantistica: gli elettroni non erano particelle con caratteristiche ondulatorie. Egli arrivò a un'equazione in cui gli elettroni *sono* onde, onde di materia. Un ruolo chiave nella famosa equazione di Schrödinger gioca la lettera greca psi, ovvero ψ. I fisici amano dire che l'equazione riduce tutto a psi. La ψ è conosciuta come *funzione d'onda*, e contiene tutto quello che conosciamo o possiamo conoscere intorno all'elettrone. Quando si risolve l'equazione di Schrödinger, essa dà le variazioni di ψ nello spazio e nel tempo. In seguito, l'equazione venne applicata a sistemi di molti elettroni e infine a ogni sistema che richieda un trattamento quantistico. In altre parole, l'equazione di Schrödinger, o la «meccanica ondulatoria», si applica ad atomi, molecole, protoni, neutroni e, cosa particolarmente importante oggigiorno, a sciami di quark, fra le altre particelle.

Schrödinger voleva salvare la fisica classica. Sosteneva che gli elettroni fossero veramente delle onde *classiche*, come le onde sonore, le onde d'acqua o le onde elettromagnetiche di Maxwell, e che il loro aspetto corpuscolare fosse illusorio. Essi erano *onde di materia*. Le onde erano fenomeni ben comprensibili e semplici da visualizzare, non come gli elettroni nell'atomo di Bohr, salterellanti senza motivo alcuno da un'orbita all'altra. Nell'interpretazione di Schrödinger, ψ (veramente il quadrato di ψ, ovvero ψ^2) descriveva la distribuzione di densità di questa onda di materia. La sua equazione rappresentava queste

onde sottoposte all'influenza delle forze elettriche presenti nell'atomo. Per esempio, nell'atomo di idrogeno le onde di Schrödinger prendono il posto delle orbite di Bohr. L'equazione fornisce automaticamente il raggio di Bohr, senza bisogno di aggiustamenti, e anche le righe spettrali, non solo dell'idrogeno, ma di tutti gli altri elementi.

Schrödinger pubblicò la sua equazione alcune settimane dopo aver lasciato la famosa villa. Essa destò immediatamente sensazione, come uno dei più potenti strumenti matematici mai inventati per trattare la struttura della materia. (Fino al 1960, erano stati pubblicati più di 100.000 lavori scientifici basati sull'equazione di Schrödinger.) Egli scrisse altri cinque articoli in rapida successione; tutti e sei vennero pubblicati nel giro di sei mesi, un periodo fra i più creativi nella storia della scienza. Robert J. Oppenheimer definì la teoria della meccanica ondulatoria «forse una delle più perfette, accurate e belle teorie scoperte dall'uomo». Arnold Sommerfeld, il grande fisico e matematico, disse della teoria di Schrödinger che era «la più stupefacente fra tutte le stupefacenti scoperte del XX secolo».

Per questo io, per quanto mi riguarda, sono disposto a perdonare a Schrödinger le sue scappatelle amorose che, dopotutto, interessano solo i biografi, coloro che fanno sociologia della scienza e i colleghi invidiosi.

Un'onda di probabilità

I fisici si innamorarono dell'equazione di Schrödinger perché era risolubile e funzionava. Sebbene la meccanica matriciale di Heisenberg e l'equazione di Schrödinger sembrassero dare ambedue la risposta corretta, la maggioranza dei fisici preferì il metodo di Schrödinger perché era una buona vecchia equazione differenziale, un aggeggio matematico familiare e di fiducia. Pochi anni più tardi si scoprì che le idee fisiche e le conseguenze numeriche delle teorie di Heisenberg e di Schrödinger erano identiche. Erano scritte solamente in linguaggi differenti. Oggi si usa una mistura degli aspetti più convenienti dell'una e dell'altra.

L'unico problema con l'equazione di Schrödinger era che la sua interpretazione dell'«onda» era sbagliata. Ci si rese conto che la ψ non poteva rappresentare onde di materia. Senza dubbio rappresentava una qualche specie di onda, ma la questione era: che cosa sta ondeggiando?

La risposta venne data dal fisico tedesco Max Born, sempre in quel fatale 1926. Egli sostenne che l'unica interpretazione coerente della

funzione d'onda di Schrödinger è quella per cui ψ^2 rappresenta la *probabilità* di trovare una particella, l'elettrone, in diverse posizioni. Il valore di ψ cambia nello spazio e nel tempo. Quando ψ^2 è grande, si ha un'alta probabilità di trovare l'elettrone. Quando $\psi = 0$, l'elettrone non si trova mai. La funzione d'onda è un'onda di probabilità.

Born venne influenzato da alcuni esperimenti nei quali un fascio di elettroni è diretto contro un qualche tipo di barriera energetica, come per esempio uno schermo di fili metallici collegati al polo negativo di una batteria, con carica diciamo di – 10 volt. Se gli elettroni hanno un'energia di soli 5 volt, essi saranno effettivamente respinti dalla barriera nel modo classico. Se l'energia di un elettrone è superiore a quella della barriera, esso penetrerà nella barriera come una palla lanciata oltre un muro. Se la sua energia è inferiore, l'elettrone rimbalza, come una palla scagliata contro il muro. Ma l'equazione quantistica di Schrödinger indicava che qualche onda ψ penetrava e qualcun'altra rimbalzava. Questo è il tipico comportamento della luce. Quando passate davanti a una vetrina vedete quello che c'è dentro, ma vedete anche una confusa immagine di voi stessi. Le onde luminose sono sia trasmesse sia riflesse dal vetro. L'equazione di Schrödinger prediceva risultati analoghi. Ma non si vedono frazioni di elettrone!

L'esperimento funziona come segue: mandiamo 1000 elettroni verso la barriera. Il contatore Geiger rileva che 550 penetrano la barriera e 450 vengono respinti ma, in entrambi i casi, è un elettrone tutto intero a essere rilevato. Le onde di Schrödinger, approssimate convenientemente, danno i valori di 550 e 450 sotto forma di proiezione statistica. Se accettiamo l'interpretazione di Bohr, un singolo elettrone ha il 55% di probabilità di penetrare e il 45% di probabilità di rimbalzare. Dal momento che un singolo elettrone non si divide mai, ecco che l'onda di Schrödinger non può essere l'elettrone. Può solo essere una probabilità.

Born, insieme con Heisenberg, faceva parte della scuola di Göttingen, un gruppo che raccoglieva alcuni dei più brillanti fisici dell'epoca la cui vita professionale e intellettuale ruotava attorno all'Università di Göttingen in Germania. L'interpretazione statistica data da Born alla psi di Schrödinger proveniva dal convincimento, proprio della scuola, che gli elettroni fossero particelle. Essi fanno fare clic ai contatori Geiger. Lasciano sottili tracce nelle camere a nebbia di Wilson. Collidono con altre particelle e rimbalzano. Ora, l'equazione di Schrödinger dà le risposte giuste, ma descrive gli elettroni come onde. Come si può convertirla in un'equazione corpuscolare?

L'ironia è una presenza costante nella storia, e l'idea che cambiò tutto proveniva da un saggio di teoria pura scritto da Einstein (ancora lui!) nel 1911, sulle relazioni tra i fotoni e le equazioni di campo di Maxwell. Einstein aveva suggerito che le quantità di campo guidassero i fotoni in quelle posizioni che hanno il più alto fattore di probabilità. La soluzione di Born al dilemma particella-onda è semplicemente questa: l'elettrone (e i suoi amici) agiscono come particelle quando sono osservati e misurati, ma la loro distribuzione nello spazio fra una misurazione e un'altra segue il modello probabilistico e ondulatorio che emerge dall'equazione di Schrödinger. In altre parole, la quantità psi di Schrödinger descrive la probabile posizione degli elettroni. E questa probabilità può comportarsi come un'onda. Schrödinger fece il lavoro duro, elaborando l'equazione che costituisce il cuore della teoria. Ma fu Born, ispirato dal lavoro di Einstein, che diede un volto a ciò che l'equazione prediceva. L'ironia della storia fa capolino nel fatto che Einstein non accettò mai l'interpretazione probabilistica di Born.

Che cosa significa tutto ciò, ovvero la fisica in sartoria

L'interpretazione data da Born all'equazione di Schrödinger è il cambiamento più drammatico e importante avvenuto nella nostra visione del mondo dai tempi di Newton. Non deve sorprendere che lo stesso Schrödinger avesse trovato l'idea così inaccettabile da rammaricarsi di aver inventato un'equazione che comportava una tale follia. Invece, Bohr, Heisenberg, Sommerfeld e altri l'accettarono senza molti problemi perché «la probabilità era nell'aria». L'articolo di Born affermava convincentemente che l'equazione può solamente prevedere una distribuzione di probabilità, ma che l'evolversi nello spazio e nel tempo di questa distribuzione è perfettamente prevedibile.

In questa nuova interpretazione, l'equazione ha a che fare con onde di probabilità, ψ, che predicono che cosa l'elettrone sta per fare, dove andrà, qual è la sua energia, e così via. Ma queste previsioni sono probabilistiche. Ciò che è «ondivago» a proposito dell'elettrone sono proprio queste previsioni probabilistiche. Queste soluzioni ondulatorie delle equazioni possono accumularsi in un certo posto raggiungendo un alto valore di probabilità e cancellarsi invece in altri dando delle basse probabilità. Quando queste previsioni sono sottoposte a controllo empirico, l'esperimento è in effetti ripetuto un gran numero di volte. E di fatto, nella maggior parte delle prove, l'elettrone finisce proprio dove l'equazione dice che c'è un'alta probabilità che finisca; solo molto raramente finisce dove la probabilità

è bassa. C'è un accordo quantitativo. Ciò che è motivo di turbamento è che in due esperimenti apparentemente identici si possono ottenere due risultati notevolmente differenti.

L'equazione di Schrödinger corredata dell'interpretazione probabilistica di Born delle funzioni d'onda ha avuto un successo enorme. È la chiave per svelare i segreti dell'idrogeno e dell'elio e, con un computer abbastanza potente, dell'uranio. Fu usata per capire come due elementi si combinano per costituire una molecola, mettendo la chimica su più sicure basi. Permette di costruire i microscopi elettronici e anche i microscopi protonici. Nel periodo 1930-1950 venne usata per studiare il nucleo e si rivelò altrettanto utile che per l'atomo.

L'equazione di Schrödinger prevede con un alto grado di accuratezza, ma, ripeto, ciò che predice sono probabilità. Che cosa significa? La probabilità in fisica è simile alla probabilità nella vita. È un affare da un miliardo di dollari, come possono garantirvi i dirigenti delle compagnie d'assicurazione, gli industriali dell'abbigliamento, e una buona parte delle 500 compagnie della lista di Fortune. Gli assicuratori vi diranno che il cittadino americano medio, bianco, non fumatore, nato, diciamo, nel 1941, vivrà 76,4 anni. Ma non possono dirvi quanto vivrà vostro fratello Sal, nato in quello stesso anno. Per quel che ne sanno, potrebbe finire sotto un'auto domani o morire per un'unghia incarnata fra due anni.

In uno dei miei corsi all'Università di Chicago gioco a fare il commerciante d'abiti. Avere successo nel ramo delle stoffe non è molto differente dal fare carriera nella fisica delle particelle. In entrambi i casi, dovete capirci molto di probabilità e avere una conoscenza diretta nel settore delle giacche di tweed. Chiedo agli studenti di dirmi la loro altezza e inserisco il dato di ciascuno in un grafico. Io ho due studenti alti un metro e quarantadue centimetri, uno di un metro e quarantasette, quattro di un metro e cinquantotto, e così via. Un tipo è un metro e novantotto, piuttosto fuori della norma. (Ah, se Chicago avesse una squadra di basket!) La media è un metro e settanta. Con un campione di 166 studenti ho una bella scala i cui gradini salgono dolcemente a un metro e settanta e poi scendono bruscamente all'anomalo valore di un metro e novantotto.

Adesso possiedo una «curva di distribuzione» dell'altezza delle matricole, e se sono ragionevolmente sicuro che la scelta dell'esame di fisica fra i fondamentali non è influenzata dall'altezza, ho un campione rappresentativo dell'altezza degli studenti all'Università di Chicago. Sulla scala verticale posso leggere le percentuali; per esempio, posso sapere quale sia la percentuale di studenti fra un

metro e sessanta e un metro e sessantacinque. Sul mio grafico posso anche leggere, se mi importa saperlo, che c'è una probabilità del 26% che il prossimo studente che incontrerò abbia un'altezza compresa fra un metro e sessantacinque e un metro e settanta.

Adesso sono pronto per fare abiti completi. Se questi studenti fossero il mio mercato (una prospettiva alquanto improbabile, se commerciassi nel ramo completi), potrei stimare la percentuale di abiti che deve essere di taglia 36, 38, e così via. Se non ho un grafico delle altezze, devo indovinare e, se sbaglio, alla fine della stagione avrò 137 completi taglia 46 invenduti (per i quali posso sempre prendermela con il mio socio Jake, quel buono a nulla!).

Quando viene applicata ai processi atomici, l'equazione di Schrödinger genera una curva analoga a quella della distribuzione delle altezze degli studenti. La forma, però, può essere molto differente. Se vogliamo sapere dove si trovi l'elettrone nell'atomo di idrogeno, ovvero quanto lontano sia dal nucleo, troveremo una qualche distribuzione che cade bruscamente a circa 10^{-8} centimetri, con più o meno un 80% di probabilità di trovare l'elettrone dentro la sfera di 10^{-8} centimetri di raggio. Questo è lo stato fondamentale. Se portiamo l'elettrone al successivo livello energetico, otterremo una curva a forma di campana con un raggio medio circa quattro volte maggiore. Possiamo calcolare curve di probabilità anche per altri processi. Dobbiamo sempre tenere ben distinte previsioni *probabili* e *possibilità*. I possibili livelli energetici li conosciamo esattamente, ma se ci chiediamo in quale di essi si troverà l'elettrone, possiamo solo calcolare una probabilità, che dipende dalla storia passata del sistema. Se l'elettrone ha più di una scelta possibile riguardo al più basso livello energetico in cui saltare, ancora, possiamo dare solo probabilità; per esempio, 82% di probabilità di saltare in E_1, 9% di saltare in E_2, e così via. Democrito aveva visto bene quando proclamò che «Tutto ciò che esiste è frutto del caso e della necessità». I diversi stati energetici sono necessari, perché sono le uniche condizioni possibili. Ma noi possiamo calcolare solo le probabilità che l'elettrone ha di trovarsi in uno qualsiasi di questi stati. È il caso a decidere.

I concetti probabilistici sono oggigiorno ben conosciuti dagli esperti delle assicurazioni. Ma erano fastidiosi per scienziati educati alla fisica classica all'inizio del secolo (e lo sono ancora oggi per molti). Newton aveva descritto un mondo deterministico. Se tirate un sasso, lanciate un razzo o introducete nuovi pianeti in un sistema solare, conoscendo le forze e le condizioni iniziali voi dovreste poter predire il risultato con totale certezza, almeno in via di principio. La teoria dei quanti afferma che questo non è possibile: le condizioni iniziali sono intrinsecamente incerte. Potete calcolare solo probabilità per le previsioni di qualsiasi cosa vogliate misurare: la posizione di una particella, la sua energia, velocità o altro. L'interpretazione data da Born alla teoria di Schrödinger era spiacevole per fisici i quali, nei tre secoli trascorsi dal tempo di Galileo e di Newton, erano arrivati ad accettare il determinismo come la base della vita. La teoria dei quanti minacciava adesso di trasformarli in cultori di scienze attuariali.

Sorprese sul cocuzzolo di una montagna

Nel 1927 il fisico inglese Paul Dirac stava cercando di appianare i contrasti fra la teoria dei quanti e la teoria della relatività ristretta di Einstein. Le due teorie erano già state reciprocamente presentate da Sommerfeld. Dirac, intento a renderle felicemente compatibili, fece da sensale al loro matrimonio e alla sua consumazione. Nel fare ciò, trovò una nuova elegante equazione per l'elettrone (guardate un po', la chiamiamo equazione di Dirac). Da questa potente equazione deriva la postilla che gli elettroni devono avere spin e devono produrre magnetismo. Si ricordi il fattore g menzionato all'inizio del capitolo. I calcoli di Dirac mostrarono che la forza magnetica dell'elettrone misurata in g era 2. (Fu solo molto più tardi che si giunse al valore preciso dato in precedenza.) Di più! Dirac (all'incirca ventiquattrenne) trovò che, ottenendo la soluzione della sua equazione per l'elettrone-onda, c'era anche un'altra soluzione dalle bizzarre implicazioni. Ci doveva essere un'altra particella con proprietà identiche a quelle dell'elettrone, ma con carica elettrica contraria. Dal punto di vista matematico, questo è un concetto piuttosto semplice. Come anche un ragazzino sa, la radice quadrata di quattro è due, ma è anche meno due, perché meno due per meno due dà quattro: $2 \times 2 = 4$ e $-2 \times -2 = 4$. Perciò ci sono due soluzioni. La radice quadrata di quattro è più *o* meno due.

Il problema era naturalmente che la simmetria implicita nell'equazione di Dirac conduceva a dover postulare l'esistenza, per ogni particella, di un'altra particella con la stessa massa ma di carica contraria. Dirac, un gentiluomo di idee conservatrici e così ammodo da diventare proverbiale, si arrovellò molto intorno alla sua soluzione negativa, e alla fine non ebbe altra scelta che predire che in natura devono esserci elettroni positivi e negativi. Qualcuno coniò il termine *antimateria*. Questa antimateria avrebbe dovuto essere tutt'attorno a noi, ma nessuno ne aveva trovato traccia fino ad allora.

Nel 1932, un giovane fisico dell'Istituto di tecnologia della California di nome Carl Anderson costruì una camera a nebbia finalizzata a registrare e fotografare particelle subatomiche. Un potente magnete circondava l'apparato allo scopo di indirizzare il cammino delle particelle, misurando la loro energia. Anderson trovò una nuova bizzarra particella o, per meglio dire, trovò la sua traccia. Egli battezzò questo nuovo strano oggetto *positrone*, perché era identico a un elettrone eccetto per il fatto che aveva una carica positiva invece che negativa. L'articolo in cui Anderson divulgava la sua scoperta non faceva riferimento alla teoria di Dirac, ma due più due fa quattro. Una nuova forma di materia era stata scoperta, quell'antiparticella che era saltata fuori dall'equazione di Dirac alcuni anni prima. Le tracce di Anderson erano lasciate dai raggi cosmici, un genere di radiazione che viaggia dai più remoti angoli della galassia fino alla nostra atmosfera. Per ottenere dati migliori, Anderson trasportò il suo apparato da Pasadena fino alla cima di una montagna nel Colorado, dove l'aria era più rarefatta e i raggi cosmici più intensi.

Una fotografia di Anderson sulla prima pagina del «New York Times», che annunciava l'evento, fu una folgorazione per il giovane Lederman, la scoperta della sua vocazione per romantici viaggi compiuti trascinando strane apparecchiature sulla cima di una montagna per rilevare importanti misurazioni scientifiche. L'antimateria si rivelò un grosso affare, inscindibile dalla vita dei fisici delle particelle, e prometto che ne dirò di più nei prossimi capitoli. Un altro successo per la teoria dei quanti.

L'indeterminazione e tutto il resto

Nel 1927 Heisenberg scoprì il suo principio di indeterminazione e mise la ciliegina sulla torta che chiamiamo rivoluzione scientifica dei quanti. Per la verità, la teoria quantistica non fu completamente sviluppata fino agli anni Quaranta e, nella versione della teoria quantistica dei campi, la sua evoluzione continua ancor oggi, e non sarà veramente completata fino a quando non sarà perfettamente integrata con la teoria della gravitazione. Ma per i nostri scopi il principio di indeterminazione è un buon punto per mettere la parola fine. Esso è una conseguenza matematica dell'equazione di Schrödinger, ma poteva benissimo essere stato il postulato iniziale, o assioma, della nuova meccanica quantistica. Dal momento che le idee di Heisenberg sono cruciali per capire quanto veramente nuovo sia il mondo dei quanti, sarà meglio soffermarci un po' su di esse.

I teorici quantistici insistono sul fatto che quello che conta è solo la misurazione, cara al cuore degli sperimentali. Tutto quanto possiamo pretendere da una teoria è che preveda certi eventi misurabili. Ciò sembrerebbe piuttosto ovvio, ma è proprio il dimenticare tale ovvietà che conduce a quei cosiddetti paradossi tanto cari a pubblicisti illetterati (fisicamente parlando). E dovrei aggiungere che è proprio nella teoria della misurazione che il sistema quantistico ha trovato, trova e, senza dubbio, troverà i suoi critici.

Heisenberg proclamò che la misurazione *simultanea* della posizione e della velocità di una particella ha dei limiti e che l'incertezza circa il valore di queste due quantità deve essere superiore a... nientepopodimeno la costante di Planck, quella h che abbiamo incontrato per la prima volta nella formula $E = hf$. Le misurazioni della posizione della particella e della sua velocità (il suo momento) sono in relazione reciproca inversa. Più sappiamo dell'una, meno sappiamo dell'altra. L'equazione di Schrödinger ci dà delle probabilità per i valori che queste quantità possono assumere. Se studiamo un esperimento per trovare la posizione dell'elettrone – diciamo che sia in certe coordinate con un margine d'incertezza molto ridotto – il margine d'incertezza circa il valore del momento è corrispondentemente ampio, e la proporzione inversa è data dall'enunciato del principio di indeterminazione di Heisenberg.

Il prodotto di queste due incertezze (possiamo assegnare loro dei numeri) è sempre maggiore dell'ubiqua h di Planck. Il principio di indeterminazione faceva piazza pulita, una volta per tutte, della classica immagine delle orbite. La stessa definizione del concetto di posizione o luogo era rivoluzionata. Torniamo per un momento a Newton e a qualcosa che possiamo visualizzare.

Supponiamo di avere una strada rettilinea sulla quale una Hyundai stia viaggiando a una discreta velocità. Decidiamo di misurare la sua posizione e velocità in un certo istante. Nella fisica newtoniana, misurando la posizione e la velocità di un oggetto in un dato istante si può prevedere esattamente dove sarà in qualsiasi istante futuro. Quando traffichiamo con il nostro Autovelox, però, scopriamo che quanto meglio siamo in grado di determinare la posizione del veicolo, tanto peggio riusciamo a misurarne la velocità e viceversa. (Si ricordi che la velocità è la distanza percorsa nel cambio di posizione divisa per il tempo impiegato.) Comunque, non sperate che questo sia un argomento per contestare la multa: nella fisica classica è possibile aumentare a piacimento la precisione di ambedue le misura-

zioni. Occorre solo che il governo spenda più soldi per comprare apparecchi sempre più perfezionati.

Nel campo degli atomi, invece, l'indeterminazione di Heisenberg riflette un'impossibilità irriducibile, alla quale non possono ovviare né apparecchi migliori, né geniali trovate, né i soldi dello stato. Heisenberg propose di considerare come una proprietà fondamentale della natura che il prodotto delle due incertezze sia sempre maggiore della costante di Planck. Per quanto strano possa sembrare, c'è una precisa ragione fisica per questa irriducibile incertezza nella misurabilità del microcosmo. Immaginate di voler trovare la posizione di un elettrone. Per farlo dovete «vederlo». Vale a dire che dovete far rimbalzare la luce, uno sciame di fotoni, sull'elettrone. Fatto! Adesso vedete l'elettrone. Conoscete la sua posizione in un certo istante. Ma un fotone che si scontra con un elettrone cambia lo stato di moto dell'elettrone. Una misurazione incide sull'altra. Nella meccanica quantistica l'operazione di misurazione produce inevitabilmente dei cambiamenti nell'oggetto misurato perché state manipolando dei sistemi atomici, e i vostri strumenti di misurazione non possono essere più piccoli e delicati di sistemi atomici. Gli atomi hanno un raggio dieci miliardi di volte più piccolo di un centimetro, e un peso di un milionesimo di un quintilionesimo di grammo: non ci vuole molto a influenzarli profondamente. Al contrario, nei sistemi classici si può essere sicuri che l'operazione di misurazione influenzi in maniera del tutto trascurabile il sistema misurato. Se vogliamo misurare la temperatura dell'acqua in un lago, non la cambiamo di molto immergendovi un piccolo termometro. Ma immergere un grosso termometro in un bicchier d'acqua sarebbe stupido, dato che il termometro provocherebbe un cambiamento nella temperatura del liquido. Nei sistemi atomici, dice la teoria dei quanti, dobbiamo includere lo strumento di misura come parte del sistema misurato.

Il tormentone della doppia fessura

L'esempio più famoso e illuminante del carattere controintuitivo della teoria dei quanti è l'esperimento della doppia fessura. Esso fu condotto per la prima volta dal fisico Thomas Young nel 1804 e venne propagandato come una prova sperimentale della natura ondulatoria della luce. In questo esperimento un fascio di luce, diciamo gialla, veniva diretto contro una parete nella quale erano state tagliate due fessure parallele molto sottili, a piccolissima distanza l'una dall'altra. Uno schermo posto dietro la parete raccoglieva la luce passata attraverso le fessure. Quando Young copriva una delle fessure, sullo schermo veniva proiettata un'immagine semplice, chiara e leggermente ingrandita dell'altra fessura. Ma quando ambedue le fessure erano coperte, il risultato era sorprendente. Un attento esame dell'area luminosa sullo schermo rivelava, in questo caso, una serie di strisce d'ombra e di strisce di luce ugualmente distanziate.

Young disse che quelle strisce erano la prova che la luce è un'onda. Perché? Perché fanno parte di un campo di interferenza, che si ha quando delle onde di qualsiasi genere collidono fra loro. Quando due onde d'acqua, per esempio, si incontrano cresta contro cresta, si rinforzano reciprocamente, creando un'onda più grande. Quando si incontrano nel cavo di una di esse, si cancellano reciprocamente, appiattendosi.

L'interpretazione che Young dava all'esperimento della doppia fessura era che in certi punti i disturbi al moto ondulatorio creati dalle fessure arrivano sullo schermo proprio nelle fasi adatte per cancellarsi reciprocamente: un picco dell'onda di luce proveniente dalla fessura uno si incontra esattamente con un cavo di luce proveniente dalla fessura due. Il risultato è una striscia d'ombra. Tali cancellazioni sono il marchio di fabbrica dell'interferenza d'onda. Quando due creste o due cavi coincidono sullo schermo, otteniamo una striscia luminosa. L'esistenza del campo di interferenza venne accettata come prova della natura ondulatoria della luce.

In linea di principio lo stesso esperimento può essere condotto anche con gli elettroni, e in un certo senso è quello che fece Davisson ai Bell Labs. Anche quando si usano gli elettroni risulta un campo di interferenza. Lo schermo è coperto con piccoli contatori Geiger, che fanno clic quando un elettrone li colpisce. Il contatore Geiger conta *particelle*. Per controllare che i contatori funzionino bene, copriamo la fessura due con un bel pezzo di piombo, così che nessun elettrone possa passare. Adesso tutti i contatori faranno clic se avremo la pazienza di aspettare che qualche migliaio di elettroni siano passati attraverso la fessura rimasta aperta. Ma quando ambedue le fessure sono aperte, alcune colonne di contatori non fanno mai clic!

Che diamine sta succedendo? Quando una fessura è chiusa, gli elettroni che passano attraverso l'altra si disperdono – alcuni a sinistra, alcuni a destra, alcuni vanno dritti – e causano una distribuzione grosso modo regolare dei clic sullo schermo, proprio come la luce gialla di Young produceva una larga riga luminosa. In altre parole,

gli elettroni si comportano, logicamente, come particelle. Ma se togliamo il piombo di modo che alcuni degli elettroni possano passare attraverso la fessura due, la distribuzione cambia e nessun elettrone colpisce quelle colonne di contatori Geiger che stanno nelle posizioni delle strisce d'ombra di Young. Ma adesso gli elettroni si stanno comportando come onde. Eppure sappiamo che sono particelle perché i contatori stanno facendo clic.

Si potrebbe ipotizzare che, forse, due o più elettroni stanno passando simultaneamente attraverso le fessure simulando così un campo di interferenza. Per verificare che non è così, riduciamo la frequenza di passaggio degli elettroni a uno al minuto. Stesso campo. Conclusione: gli elettroni che passano per la fessura uno «sanno» se la fessura due è aperta o chiusa, perché cambiano il loro comportamento secondo il caso. Come arriviamo a questa idea di elettroni «intelligenti»? Mettetevi al posto dello sperimentatore. Avete un cannone a elettroni, e sapete che state sparando particelle contro la parete con le fessure. Sapete anche che ciò che colpisce lo schermo al di là della parete sono particelle, perché i contatori Geiger fanno clic. Un clic significa una particella. Però, dove le particelle finiscano, dipende dal fatto che una o due fessure siano aperte. Perciò una particella che passa per la fessura uno sembra che sappia se la fessura due è aperta o chiusa, perché risulta che la posizione in cui finirà dipende da questa informazione. Se la fessura due è chiusa, l'elettrone dice a se stesso: «Okay, posso colpire lo schermo dove voglio». Se la fessura due è aperta, allora dice: «Oh! devo evitare certe zone dello schermo in modo da creare una distribuzione a strisce». Ora, dal momento che le particelle non «pensano», la natura duale, onda-particella, dell'elettrone ha provocato una crisi logica.

La meccanica quantistica afferma che noi possiamo prevedere la probabilità del passaggio degli elettroni attraverso le fessure e del loro susseguente arrivo sullo schermo. La probabilità è un'onda, e le onde hanno campi di interferenza. Quando ambedue le fessure sono aperte, le onde di probabilità ψ possono interferire con il risultato di avere probabilità zero ($\psi = 0$) per certe posizioni sullo schermo. Le perplessità antropomorfiche del precedente paragrafo sono un mal di testa dovuto alla nostra abitudine a pensare nei termini della fisica classica. Nel mondo dei quanti, la domanda «In che modo l'elettrone conosce attraverso quale fessura deve passare?» non è una domanda alla quale si possa rispondere con un esperimento. La traiettoria dell'elettrone non può essere osservata punto per punto, e perciò la domanda «Per quale fessura passa l'elettrone?» non è un problema di tipo operazionale. Infatti il principio di indeterminazione di Heisenberg (la nostra compressa contro i mal di testa «classici») dice che se voi cercate di misurare la traiettoria che l'elettrone segue dal cannone alla parete, cambierete totalmente il moto dell'elettrone, annullando l'esperimento. Possiamo conoscere le condizioni iniziali (gli elettroni sparati dal cannone); possiamo conoscere i risultati finali (gli elettroni colpiscono certi punti dello schermo); *non* possiamo conoscere il cammino da A a B, a costo di vanificare l'esperimento. Questa è la fantasmatica natura del nuovo mondo atomico.

La soluzione quantistica, vale a dire «Non preoccupatevi! Non lo possiamo misurare», è abbastanza logica, ma non soddisfacente per molte menti umane che si affannano per comprendere ogni dettaglio del mondo che ci circonda. Per queste anime in pena, tale inconoscibilità quantistica è un prezzo troppo alto da pagare. La nostra difesa è che questa è la sola teoria che finora funzioni.

Newton contro Schrödinger

Anche l'intuizione, o meglio, ciò che ci sembra essere intuitivamente comprensibile, deve cambiare. Passiamo anni a insegnare agli studenti di fisica la teoria classica, poi facciamo una piroetta e insegniamo loro la teoria dei quanti. Ci vogliono due o tre anni perché gli studenti di dottorato accettino come intuitivi i fatti quantistici. (A te, fortunato lettore, è chiesto di imparare a fare la piroetta dopo un solo capitolo.)

La questione riguarda, ovviamente, chi ha ragione: Newton o Schrödinger? La busta, prego, e il vincitore è... Schrödinger! La fisica di Newton era fatta per grandi oggetti e non funziona dentro l'atomo. La teoria di Schrödinger era fatta per i microfenomeni, ma quando si applica a situazioni macroscopiche dà risultati identici a quella di Newton.

Facciamo un esempio classico. La Terra orbita intorno al Sole. Un elettrone orbita – per usare il vecchio linguaggio di Bohr – intorno al nucleo. L'elettrone, però, è costretto a seguire delle orbite specifiche. Ci sono delle orbite quantistiche intorno al Sole che siano le uniche ammissibili per la Terra? Newton avrebbe detto no, il pianeta è libero di scegliere le orbite che vuole. Ma la risposta corretta è sì. Possiamo applicare l'equazione di Schrödinger al sistema Terra-Sole. Essa darebbe il solito insieme discreto di orbite quantistiche, ma il loro numero sarebbe assai grande. Nello sviluppo dell'equazione dob-

biamo inserire la massa della Terra (invece della massa dell'elettrone) a denominatore, e quello che succede è che la distanza fra un'orbita e l'altra si fa così piccola che l'insieme diventa, agli effetti pratici, un insieme continuo. E così si ottiene il risultato newtoniano che *tutte* le orbite sono permesse. Se prendete l'equazione di Schrödinger e la applicate a macro-oggetti, essa si muta sotto i vostri occhi in... $F = ma$! All'incirca. Fu Boscovich, sia ricordato di passaggio, colui che sostenne nel XVIII secolo come le formule di Newton fossero semplici approssimazioni buone per le grandi distanze ma non per il microcosmo. E così i nostri studenti non devono buttar via i loro libri di meccanica classica. Essi servono ancora per ottenere un posto alla NASA o nella squadra dei Chicago Cubs, per tracciare traiettorie di rientro per missili o per palle da baseball con delle buone vecchie equazioni newtoniane.

Nella teoria dei quanti, il concetto di orbita o di ciò che l'elettrone stia facendo nell'atomo o in uno sciame di particelle non serve. Ciò che importa è il risultato di una misurazione, e qui i metodi quantistici possono solamente dare la probabilità di ogni possibile risultato. Se misurate la posizione dell'elettrone, diciamo nell'atomo di idrogeno, il vostro risultato dovrebbe essere un numero, la distanza dell'elettrone dal nucleo. Ma per far ciò voi non misurate un singolo elettrone, ma ripetete la misurazione molte volte. Ottenete un risultato diverso ogni volta, e alla fine tracciate una curva che rappresenta tutti i risultati. È questa curva che deve essere confrontata con ciò che prevede la teoria. Essa non può prevedere il risultato di ogni singola misurazione: è statistica. Per tornare alla mia analogia del fabbricante d'abiti, se sappiamo che l'altezza media delle matricole dell'Università di Chicago è un metro e settanta, la prossima matricola che osserveremo può benissimo essere alta un metro e sessanta oppure un metro e ottantacinque. Non possiamo predire l'altezza della singola matricola; possiamo solo tracciare una curva statistica.

Dove la teoria diventa stramba, è in previsioni del tipo del passaggio di una particella attraverso una barriera o del decadimento di un atomo radioattivo. Noi prepariamo lo stesso *identico* esperimento molte volte. Spariamo un elettrone a 5 MeV contro una barriera di potenziale 5,5 MeV. Prediciamo che 45 volte su 100 la penetrerà. Ma non possiamo sapere che cosa farà un singolo elettrone. Uno passerà; un altro, in tutto e per tutto identico al primo, no. Esperimenti identici danno risultati diversi. Questo è il mondo dei quanti. Nella fisica classica noi sottolineiamo sempre l'importanza di ripetere gli esperimenti. Nel mondo dei quanti possiamo ripetere tutto, tranne il risultato.

Allo stesso modo, prendiamo il neutrone, la cui vita ha «il mezzo del cammin» a 10,3 minuti: ciò significa che se voi avete 1000 neutroni, la metà si saranno disintegrati dopo 10,3 minuti. Ma il singolo neutrone? Esso può decadere in 3 secondi oppure in 29 minuti. Il suo tempo esatto di decadimento non è prevedibile. Einstein odiava questa idea. «Dio non gioca a dadi con l'universo» diceva. Altri critici hanno detto: supponiamo che in ciascun neutrone o elettrone ci sia qualche meccanismo, qualche «variabile nascosta» che rende ciascun neutrone differente, come gli esseri umani, i quali hanno anche loro una vita media. Nel caso degli esseri umani, ci sono un sacco di variabili non tanto nascoste – difetti genetici, arterie occluse, e così via – che in linea di principio possono essere usate per predire la data di ritiro dalla circolazione di ogni singolo individuo, a parte cose come ascensori che precipitano, amori infelici o Mercedes che finiscono fuori strada.

L'ipotesi della variabile nascosta è stata sostanzialmente respinta per due ragioni: non solo nessuna variabile di tal genere è spuntata fuori nei miliardi di esperimenti fatti sugli elettroni, ma la sua esistenza è stata esclusa da nuove e migliori teorie riguardanti gli esperimenti quantistici.

Tre cose da ricordare a proposito della meccanica quantistica

Si può dire che la meccanica quantistica abbia tre notevoli qualità: (1) è controintuitiva; (2) funziona; (3) ha aspetti problematici, che l'hanno resa inammissibile per quelli come Einstein e Schrödinger e ne hanno fatto una fonte di continui studi fin negli anni Novanta. Vediamole una per volta, queste qualità.

1. *È controintuitiva*. La meccanica quantistica sostituisce quantità continue con quantità discrete. Metaforicamente parlando, invece di versare un liquido nel bicchiere, stiamo versando della sabbia fine. Il delicato mormorio che udite è provocato da un grande numero di atomi che stanno battendo contro i vostri padiglioni auricolari. C'è poi il fantasmagorico esperimento della doppia fessura, del quale abbiamo già parlato.

Un altro fenomeno controintuitivo è l'«effetto tunnel». Abbiamo già parlato della possibilità di scagliare degli elettroni contro una barriera d'energia. L'analogo classico è il far rotolare una pallina su per un pendio. Se date alla pallina una spinta iniziale sufficiente, essa riu-

scirà ad andare oltre la sommità. Se l'energia iniziale è troppo debole, la pallina tornerà indietro. O immaginate un vagoncino delle montagne russe fra due terrificanti cime. Supponete che il vagoncino salga una di queste per metà e poi perda spinta. Allora scivolerà indietro, poi risalirà quasi metà dell'altra montagna, poi andrà avanti e indietro, intrappolato nell'avvallamento. Se potessimo eliminare l'attrito, esso oscillerebbe per sempre, imprigionato fra due insormontabili salite. Nella teoria dei quanti un tale sistema è noto come stato «legato». Descrivendo quello che succede agli elettroni scagliati contro una barriera energetica o a un elettrone intrappolato fra due barriere, invece, dobbiamo usare onde di probabilità. Succede che qualcuna delle onde possa «sgusciare» attraverso la barriera (nei sistemi atomici o nucleari la barriera è elettrica oppure è un'interazione forte), e perciò c'è una probabilità finita che la particella si liberi dalla trappola. Questo non solamente era controintuitivo, ma era considerato un grave paradosso, poiché l'elettrone nel suo passaggio attraverso la barriera dovrebbe avere energia cinetica negativa, un'assurdità dal punto di vista classico. Ma, con l'evolversi di un'intuizione quantistica, si può rispondere che la condizione dell'elettrone *nel tunnel* non è uno stato osservabile e dunque non è un problema per la fisica. Ciò che si osserva è che l'elettrone esce. Questo fenomeno, chiamato «effetto tunnel», venne usato per spiegare la radioattività alfa ed è alla base di un importante strumento dell'elettronica dello stato solido conosciuto come «diodo tunnel». Per quanto strambo sia, l'«effetto tunnel» è essenziale per i moderni computer e per altri marchingegni elettronici.

Particelle puntiformi, «effetto tunnel», radioattività, il tormentone della doppia fessura: tutto ciò contribuì a sviluppare le nuove intuizioni di cui i fisici quantistici avevano bisogno nei tardi anni Venti e negli anni Trenta per attaccare fenomeni inspiegati con il loro nuovo armamentario intellettuale.

2. *Funziona.* L'atomo venne compreso. In quegli anni 1923-1927, precedenti all'era dei computer, solo atomi semplici – idrogeno, elio, litio e atomi nei quali erano rimossi (ionizzati) alcuni elettroni – potevano essere compiutamente analizzati. Un passo decisivo venne fatto da Wolfgang Pauli, uno dei *Wunderkinder*, uno che aveva capito tutto della teoria della relatività a diciannove anni e che era già un «senatore» della fisica quando ne era ancora un *enfant terrible*.

Una digressione su Pauli è, a questo punto, inevitabile. Famoso per l'eccellenza che richiedeva a sé e ai suoi collaboratori e per l'irascibilità, Pauli era l'avvocato del diavolo della fisica del suo tempo. Oppure lo faceva così, candidamente? Abraham Pais ricorda che una volta Pauli si lamentò con lui di non riuscire a trovare un problema veramente stimolante su cui lavorare: «Forse è perché ne so troppo». Non era una vanteria, solo una constatazione. Potete immaginare come fosse tosto con i suoi assistenti. Quando un nuovo, giovane assistente si presentò da lui a Zurigo – si trattava di Victor Weisskopf, che sarebbe diventato uno dei teorici di punta – Pauli lo squadrò, scosse la testa e borbottò: «Ach! così giovane e già così sconosciuto». Dopo qualche mese, Weisskopf andò da Pauli con un nuovo lavoro teorico. Pauli diede un'occhiata, ed esclamò: «Ach! non è neanche sbagliato!». A un ricercatore disse: «Non mi importa che siate lento di comprendonio. Mi preoccupa che cento ne pubblicate e una ne pensate». Nessuno era al sicuro da Pauli. Nel raccomandare un tipo come assistente a Einstein, il quale, nei suoi ultimi anni, era perso dietro alle difficoltà matematiche della sua infruttuosa ricerca di una teoria unificata dei campi, Pauli gli scrisse: «Caro Einstein, questo studente è bravo, anche se non capisce bene la differenza che c'è fra la matematica e la fisica. D'altra parte, è molto tempo che neanche voi la capite più, caro maestro». Il nostro Wolfgang era fatto così.

Nel 1924 Pauli aveva proposto un principio fondamentale che forniva la spiegazione della tavola periodica degli elementi di Mendeleev. Il problema era: noi costruiamo gli atomi degli elementi chimici più pesanti aggiungendo carica positiva a nuclei ed elettroni ai vari livelli energetici permessi dell'atomo (le orbite, nella vecchia teoria dei quanti). Dove vanno gli elettroni? Lo studioso formulò quello che divenne noto come «principio di esclusione di Pauli»: due elettroni non possono occupare lo stesso livello. All'inizio solo un'audace ipotesi, il principio si rivelò essere conseguenza di una più profonda e notevole simmetria.

Vediamo come Babbo Natale fa gli elementi chimici, là nella sua bottega. Deve fare le cose per bene perché lavora per l'Onnipotente, e Lei, si sa, è esigente. Per l'idrogeno è facile. Prende un protone – il nucleo – e vi aggiunge un elettrone, che va a occupare il livello energetico più basso possibile (nella vecchia teoria di Bohr, ancora utile per dare un'immagine visiva, l'orbita con il più piccolo raggio ammissibile). Babbo Natale non deve essere molto preciso, in questo caso: basta che metta l'elettrone giusto vicino al protone e quello «salta» per conto suo al più basso livello «fondamentale», emettendo fotoni durante il salto. Adesso l'elio. Egli assembla il nucleo di elio, che ha carica positiva doppia. Dunque ha bisogno di due elettroni. E per il litio ha bisogno di tre elettroni per fare un atomo elettricamen-

te neutro. La questione è: dove vanno questi elettroni? Nel mondo dei quanti, solo certi stati sono permessi. Si affollano forse tre, quattro, cinque e più elettroni nello stato fondamentale? Qui interviene il principio di Pauli. No, dice Pauli, due elettroni non possono trovarsi nello stesso stato quantico. Nell'atomo di elio, al secondo elettrone è consentito stare nel più basso livello energetico insieme al primo *solo se* il suo spin è contrario a quello del compagno. Quando aggiungiamo il terzo elettrone, per fare l'atomo di litio, esso non può più stare al livello più basso e deve andare nel più basso livello successivo. Questo ha un raggio molto più grande (per dirla ancora alla Bohr), e ciò spiega l'attività chimica del litio, vale a dire, la facilità con cui può usare questo elettrone solitario per combinarsi con altri atomi. Dopo il litio troviamo l'atomo con quattro elettroni, il berillio, in cui il quarto elettrone raggiunge il terzo nel suo «guscio», come sono chiamati i livelli energetici. Così procedendo allegramente – berillio, boro, carbonio, azoto, ossigeno, neon – aggiungiamo elettroni fino a che Pauli dice «Quel guscio è pieno! Si passi al prossimo». In breve, la regolarità delle proprietà degli elementi chimici proviene da questa architettura quantistica che obbedisce al principio di Pauli. Alcuni decenni prima, gli scienziati avevano deriso l'insistenza del buon Mendeleev nell'allineare gli elementi in righe e colonne secondo le loro caratteristiche. Pauli dimostrò che questa periodicità era collegata in modo preciso a differenti gusci e agli stati quantici degli elettroni: due possono stare nel primo guscio, otto nel secondo, otto nel terzo, e così via. La tavola periodica degli elementi aveva in effetti un profondo significato.

Riassumiamo questa importante idea. Pauli aveva scoperto una regola secondo la quale gli elementi chimici cambiano la loro struttura elettronica. Questa regola rende conto delle proprietà chimiche (perché un gas è inerte, perché un metallo è attivo, e così via), collegandole con il numero e lo stato degli elettroni, specialmente quelli dei gusci esterni, là dove entrano più facilmente in contatto con altri atomi. Un'importante implicazione del principio di Pauli è che quando un guscio è pieno, è impossibile aggiungervi un altro elettrone. La forza di resistenza è possente. Questa è la vera ragione dell'impenetrabilità della materia. Sebbene gli atomi siano per il 99,99% fatti di spazio vuoto, noi non possiamo passare attraverso un muro. Ciò è indubbiamente frustrante. Perché? Nei solidi, dove gli atomi sono connessi da complicate attrazioni elettriche, l'incontro fra gli elettroni del nostro corpo e quelli degli atomi del muro deve obbedire al divieto imposto da Pauli: gli elettroni non possono avvicinarsi oltre un certo limite.

Un proiettile è in grado di penetrare un muro perché spezza i legami atomici e, come un giocatore di football americano, apre spazi per i suoi elettroni. Il principio di Pauli gioca un ruolo cruciale anche nella spiegazione di quegli oggetti bizzarri e romantici che sono le stelle di neutroni e i buchi neri. Ma sto divagando.

Una volta che abbiamo ben compreso gli atomi, possiamo risolvere il problema di come si combinano per fare molecole, per esempio H_2O oppure NaCl. Le molecole si formano grazie al complesso di forze esistente fra gli elettroni e i nuclei degli atomi che si uniscono a comporle, e la dislocazione degli elettroni nei loro gusci provvede a creare una molecola stabile. La chimica ha oggi un sicuro fondamento scientifico grazie alla teoria dei quanti. La chimica quantistica è un campo in grande fioritura, che ha prodotto nuove discipline come la biologia molecolare, l'ingegneria genetica, la medicina molecolare. Nella scienza dei materiali, la teoria dei quanti ci aiuta a spiegare e a controllare le proprietà dei metalli, degli isolanti, dei superconduttori e dei semiconduttori. I semiconduttori hanno portato alla scoperta dei transistor, gli inventori dei quali hanno riconosciuto la loro fonte di ispirazione nella teoria quantistica dei metalli. E da questa scoperta sono derivati i computer e la microelettronica, la rivoluzione delle comunicazioni e dell'informazione. E poi ci sono i maser e i laser, che sono sistemi quantistici.

Da quando le nostre operazioni di misura sono penetrate nel nucleo atomico – con una scala 100.000 volte più piccola di quella dell'atomo – la teoria quantistica è diventata uno strumento indispensabile. In astrofisica, i processi stellari producono oggetti esotici come i soli, le stelle giganti rosse, le nane bianche, le stelle di neutroni e i buchi neri. Dal punto di vista dell'utilità sociale, dalla teoria dei quanti dipende, come abbiamo già stimato, circa il 25% del prodotto nazionale lordo delle potenze industriali. Pensate, da una parte ci sono quei fisici europei ossessionati dai loro atomi e dall'altra ci sono migliaia di miliardi di dollari di reddito derivante alla fin fine dalla loro ossessione. Se solamente un governo saggio e preveggente avesse messo una tassa dello 0,1% sui prodotti che fanno uso di tecnologia quantistica, utilizzandone i proventi per la ricerca e la pubblica istruzione... Comunque, questa roba funziona.

3. *Ha aspetti problematici.* Essi riguardano la funzione d'onda (psi, o ψ) e quello che essa significa. Nonostante il grande successo pratico e intellettuale della teoria dei quanti, non possiamo essere sicuri di sapere ciò che veramente significhi. Il nostro disagio può essere intrinsecamente dovuto al modo in cui è fatta la mente umana, op-

pure può darsi che un bel giorno arrivi un genio a produrre uno schema concettuale che farà tutti contenti. Comunque non preoccupatevi per il vostro disagio: non siete solo voi duri di comprendonio, ma avete buona compagnia. Planck, Einstein, de Broglie, Schrödinger e molti altri fisici erano scontenti della teoria dei quanti.

Esiste una ricca letteratura a proposito delle obiezioni alla natura probabilistica della teoria dei quanti. Einstein fu alla testa dei critici, in un duraturo sforzo (non facile da seguire) rivolto a mettere in crisi il principio di indeterminazione, ma trovò sempre pronto alla risposta Bohr, il quale stabilì, nel corso di questo dibattito, quella che oggi è chiamata «l'interpretazione di Copenaghen» della funzione d'onda. Bohr ed Einstein andarono veramente al cuore della questione. Einstein inventava un esperimento mentale che colpiva dritto al cuore la nuova teoria, e Bohr trovava il punto debole nel ragionamento di Einstein, in genere lavorandoci sopra duramente per un lungo fine settimana. Einstein era il Pierino della situazione. Come il ragazzino che fa domande imbarazzanti alla lezione di catechismo («Se l'Onnipotente è davvero tale, può creare una roccia così pesante che nemmeno Lei riesce a spostare?»), Einstein continuava a produrre paradossi mentali per la teoria dei quanti. E Bohr era il prete che continuava a controbattere alle obiezioni di Einstein.

Si narra che molte delle loro discussioni avessero luogo durante delle passeggiate nei boschi. Mi immagino quello che sarebbe successo se avessero incontrato un orso. Bohr avrebbe immediatamente tolto un paio di Reebok Pump da 300 dollari dalla borsa e avrebbe cominciato ad allacciarsele. «Che cosa stai facendo, Niels? Lo sai che non puoi correre più veloce di un orso» avrebbe osservato, piuttosto logicamente, Einstein. «Ah! ma non devo battere l'orso, caro Albert» avrebbe risposto Bohr. «Devo solo correre più veloce di te.»

Per il 1936 Einstein avrebbe ammesso, seppure con riluttanza, che la teoria dei quanti descrive correttamente tutti i possibili esperimenti, perlomeno tutti quelli immaginabili. Egli allora decise di cambiare obiettivo e di sostenere che la teoria non poteva essere una descrizione completa del mondo, anche se forniva le probabilità corrette per i risultati di diverse misurazioni. La difesa di Bohr fu che quell'incompletezza che disturbava Einstein non era un difetto della teoria, ma una proprietà del mondo in cui viviamo. Sono sicuro che questi due avranno continuato a discutere di meccanica quantistica anche nella tomba, a meno che il «Vecchio Uno», come Einstein chiamava Dio, non abbia risolto la questione una volta per tutte.

Il dibattito fra Einstein e Bohr richiederebbe dei libri interi per essere raccontato, ma io cercherò di illustrare il nocciolo del problema con un solo esempio. Ricordiamoci la proposizione fondamentale di Heisenberg: nessun tentativo di misurare simultaneamente la posizione nello spazio e la velocità di una particella può essere interamente coronato da successo. Si predisponga un'operazione di misura per localizzare l'atomo: questa la possiamo fare, precisa a piacere. Si predisponga un'operazione per misurare la sua velocità: anche questa la possiamo fare, precisa a piacere. Ma tutte e due insieme, no. Il frammento di mondo fisico che queste misurazioni rivelano dipende dalla strategia dello sperimentatore. Questa soggettività mette in crisi le nostre amate opinioni sulla relazione di causa ed effetto. Se un elettrone parte da un punto A e arriva a un punto B, sembra «naturale» assumere che abbia seguito un particolare percorso da A a B. La teoria dei quanti nega ciò, dicendo che il percorso non è conoscibile. Tutti i percorsi sono possibili, ciascuno con la sua probabilità.

Per mettere in luce l'incompletezza di questa teoria della traiettoria fantasma, Einstein escogitò un esperimento cruciale. Non cercherò di rendere pienamente giustizia alla sua idea, ma solamente di esprimere l'idea di base. È chiamato «esperimento mentale EPR», dai nomi dei suoi tre inventori, Einstein, Podolsky e Rosen. Essi presero in considerazione un esperimento con due particelle, dove il destino dell'una è legato a quello dell'altra. Ci sono dei modi di produrre un paio di particelle che si allontanano l'una dall'altra, e tali che se una ha spin «su» l'altra ha spin «giù», o se una ha spin «destro» l'altra ha spin «sinistro». Mandiamo una di queste particelle a Bangkok e l'altra a Chicago. Va bene, disse Einstein, accettiamo pure l'idea che noi non possiamo conoscere nulla di una particella se non quando effettuiamo una misurazione. Allora misuriamo la particella A, a Chicago, e scopriamo che ha spin «destro». Ergo, noi sappiamo qualcosa della particella B, quella che sta a Bangkok, e il cui spin deve ancora essere misurato. Prima che la misurazione venisse effettuata a Chicago, la probabilità che avesse spin «sinistro» piuttosto che «destro» era del 50%. Adesso, dopo la misurazione di Chicago, sappiamo che la particella B deve avere spin «sinistro». Ma come fa la particella B a sapere quale sia stato il risultato dell'esperimento di Chicago? Anche se è equipaggiata con una piccola radio, le onde radio viaggiano alla velocità della luce, e ci vuole qualche tempo prima che la notizia arrivi. Qual è dunque questo meccanismo di trasmissione, che non ha la cortesia di viaggiare alla velocità della luce? Einstein lo chiamò «azione fantasma a distanza». La conclusione suggerita dall'esperi-

mento EPR era che l'unico modo di spiegare la connessione fra ciò che accade ad A (la decisione di misurarla a Chicago) e ciò che accade a B è quello di fornire una descrizione più dettagliata, che la teoria dei quanti non può offrire. Ah! ecco che la meccanica quantistica non è completa, esclamò Einstein.

Perfino il traffico si fermò a Copenaghen, quando Bohr si mise a pensare al problema EPR. Einstein stava cercando di bidonare il principio di indeterminazione di Heisenberg misurando una particella che era d'accordo con lui. La risposta di Bohr fu che non si possono separare gli eventi A e B, e che il sistema fisico in considerazione deve includere A, B e l'osservatore che decide quando fare le misurazioni. Questa risposta di tipo olistico sembrava contenere un certo alone di misticismo orientaleggiante, e (troppi) libri sono stati scritti su questa influenza. La questione è se la particella A e l'osservatore di A abbiano un'esistenza fisica reale, oppure siano degli irrilevanti fantasmi intermedi fra un'operazione di misurazione e un'altra. Tale questione particolare è stata risolta da una scoperta teorica e da un brillante esperimento (eccolo qua, l'esperimento!).

Grazie a un teorema formulato nel 1964 da un teorico delle particelle di nome John Bell, divenne chiaro che una forma modificata dell'esperimento mentale EPR poteva in effetti essere condotta in laboratorio. Bell stesso escogitò un esperimento che prevedeva differenti risultati per una misura di correlazione a grande distanza fra le particelle A e B, a seconda che l'interpretazione di Einstein oppure quella di Bohr fosse quella corretta. Il teorema di Bell è diventato quasi un oggetto di culto, e ciò è dovuto in parte al fatto che sta tutto su una T-shirt. C'è almeno un club femminile, mi sembra a Springfield, che si riunisce tutti i giovedì pomeriggio per discutere il teorema di Bell. Con grande dispiacere dello stesso studioso, il suo teorema è stato sbandierato da alcuni come una «prova» dell'esistenza di fenomeni paranormali.

L'idea di Bell ha ispirato una serie di esperimenti, il più riuscito dei quali è stato quello condotto a Parigi nel 1982 da Alan Aspect e dai suoi colleghi. L'esperimento è consistito nella misurazione del numero di volte in cui i risultati dell'osservazione di A sono stati correlati con i risultati dell'osservazione di B, cioè, spin «sinistro» e spin «destro» oppure spin «destro» e spin «sinistro». L'analisi di Bell permetteva di predire questa correlazione usando sia l'interpretazione di Bohr che sostiene che la teoria dei quanti è «completa» per quanto può esserlo una teoria dei fenomeni atomici, sia l'interpretazione di Einstein secondo la quale ci devono essere delle variabili

nascoste che determinano la correlazione. L'esperimento di Aspect e soci ha dimostrato chiaramente che l'analisi di Bohr è quella corretta. Apparentemente, dunque, esiste in natura una correlazione a distanza fra particelle.

È questa la fine del dibattito? Certamente no. Esso va avanti. Uno dei luoghi più affascinanti e intriganti in cui i fantasmi quantistici sono apparsi è la nascita dell'universo. Nelle primissime fasi della creazione l'universo aveva dimensioni subatomiche, e la fisica quantistica vale allora per l'intero universo. Posso pretendere di parlare a nome della massa dei fisici quando dico che io, per quanto riguarda il mio lavoro di ricerca, mi limito al mio acceleratore, ma sono veramente lieto che qualcuno stia ancora riflettendo sui fondamenti concettuali della teoria dei quanti.

Per il resto di noialtri, ci bastano le equazioni di Schrödinger, di Dirac e quelle più recenti della teoria quantistica dei campi. La strada che porta alla particella di Dio – o almeno il suo inizio – è ora chiara davanti a noi.

Interludio B

I maestri Moo-Shu che danzano

Durante quella fatica senza fine che fu l'opera di sollevare, e risollevare, entusiasmi per la costruzione del Super Collisore Superconduttore (SSC), andai a far visita, nel suo ufficio di Washington, al senatore Bennett Johnston, un democratico della Louisiana il cui appoggio era importante per il destino del Super Collisore, che aveva un costo stimato in 8 miliardi di dollari. Johnston era un tipo curioso, per essere un senatore. Gli piaceva parlare di buchi neri, distorsioni temporali e altri fenomeni. Appena entrai nel suo ufficio, si alzò dalla scrivania e mi mise sotto il naso un libro. «Lederman» mi implorò, «devo farle un sacco di domande su questo libro.» Il libro era *I maestri Wu Li che danzano* di Gary Zukav. La nostra conversazione venne da lui allungata dal «quarto d'ora» che avevo chiesto a un'ora buona, parlando di fisica. Io cercavo disperatamente un buco, una pausa nella conversazione per infilarci una buona parola a pro del Super Collisore («A proposito di protoni, ho questa macchina...»). Ma Johnston era inarrestabile. Parlava di fisica senza fermarsi. Quando il suo segretario lo interruppe per la quarta volta per rammentargli un altro appuntamento, egli sorrise e mi disse: «Guardi, lo so perché è venuto. Se avesse fatto il suo pistolotto, avrei risposto "farò quel che posso". Ma questo è stato molto più divertente! E io farò davvero quel che posso». Di fatto, fece molto.

Per me era un po' fastidioso che un senatore degli Stati Uniti, affamato di sapere, avesse soddisfatto la sua curiosità con il libro di Zukav. Negli ultimi anni sono apparsi un sacco di libri – un altro esempio è *Il Tao della fisica* – che tentano di spiegare la fisica moderna nei termini delle religioni e del misticismo orientale. Gli autori sono disposti a concludere estasiati che siamo tutti quanti parte del cosmo e il cosmo è parte di noi. Noi siamo un tutto! (Anche se quegli

scettici miscredenti della American Express si ostinano a mandare gli estratti conto ai singoli individui.) La mia preoccupazione era che un senatore potesse ricavare qualche strana idea da uno di questi libri giusto prima di un voto importante su una macchina da 8 miliardi e passa di dollari che avrebbe dovuto essere manovrata da fisici materialisti. Ma Johnston, per fortuna, sapeva di fisica e anche di scienziati.

La fonte di ispirazione per questo genere di libri è proprio la teoria dei quanti con le sue intrinseche bizzarrie intellettuali. Uno di questi, particolarmente svergognato, presenta delle sobrie esposizioni del principio di indeterminazione di Heisenberg, dell'esperimento mentale di Einstein-Podolsky-Rosen, del teorema di Bell, e poi si lancia in estatiche descrizioni di «viaggi» da LSD, fantasmi ed ectoplasmi vari e dello spirito di un trapassato di nome Seth che manda i suoi messaggi tramite la voce e la mano di una tale Elmira, casalinga di New York. La tacita premessa di questo libro, e di molti altri simili, è, evidentemente: dato che la teoria dei quanti è strana, perché non accettare altre stranezze come fatti scientifici?

Uno non si preoccuperebbe di questi libri se si trovassero negli scaffali delle librerie dedicati a religione, fenomeni paranormali o fantasy. Sfortunatamente, si trovano invece spesso nel settore scienze, probabilmente perché nei loro titoli ci sono parole come «quanti» e «fisica». Troppo di quello che il vasto pubblico conosce della fisica, lo conosce attraverso questi libri. Prenderò solo due di essi, i più popolari del mucchio: *Il Tao della fisica* e *I maestri Wu Li che danzano*, ambedue pubblicati negli anni Settanta. Per essere giusti, il *Tao*, di Fritjof Capra, che vanta un dottorato conseguito all'Università di Vienna, e il *Wu Li*, di Gary Zukav, uno scrittore, hanno avuto il merito di introdurre molta gente alla fisica, il che è un bene. E certamente non c'è nulla di male nel trovare parallelismi fra la nuova fisica quantistica e l'induismo, il buddismo, il taoismo, lo zen o la cucina dello Hunan, per quel che importa. Capra e Zukav hanno anche riportato molte cose correttamente. E c'è della buona fisica in ambedue questi libri, ciò che dà loro un'aria di credibilità. Sfortunatamente, gli autori saltano poi dal terreno di solidi e provati concetti scientifici a quello di concetti che sono al di là della fisica, e fra i due territori il ponte è molto meno logicamente sicuro di quello che credono, quando non esista del tutto.

Nel *Wu Li*, per esempio, Zukav spiega bene il famoso esperimento della doppia fessura di Thomas Young. Ma la sua analisi dei risultati è alquanto bizzarra. Come abbiamo già detto, poiché si ottengo-

no differenti schemi di fotoni (o di elettroni) a seconda che una sola o ambedue le fessure siano aperte, la sperimentatrice può domandarsi: «Come fa la particella a *sapere* quante fessure sono aperte?». Ma questo, naturalmente, è un modo di dire che antropomorfizza un problema che riguarda un meccanismo. Il principio di indeterminazione di Heisenberg, che sta alla base della teoria dei quanti, afferma che non è possibile determinare attraverso quale fessura passi la particella senza distruggere l'esperimento stesso. Per la teoria dei quanti, curiosa ma concettualmente rigorosa, si tratta di una domanda irrilevante.

Ma Zukav ricava una morale differente dalla storia delle due fessure: la particella *sa* se una o due fessure sono aperte. I fotoni sono intelligenti! Aspettate, c'è di meglio. «Non abbiamo altra scelta che riconoscere» scrive Zukav «che i fotoni, che sono energia, sembrano essere capaci di elaborare informazioni e di agire di conseguenza, e che perciò, per quanto strano possa apparire, essi sembrano essere qualcosa di organico.» Questa è una barzelletta, forse anche una barzelletta filosofica, ma abbiamo lasciato il territorio della scienza.

Paradossalmente, mentre è pronto ad attribuire una coscienza ai fotoni, Zukav rifiuta di accettare l'esistenza degli atomi. Egli scrive: «Gli atomi non sono entità "reali". Essi sono entità ipotetiche designate a rendere intelligibili le osservazioni sperimentali. Nessuno ha mai visto un atomo». Eccola qua di nuovo, la nostra signora fra il pubblico, che ci sfida con la domanda «Avete mai visto un atomo?». Per essere equanimi verso la signora, lei almeno era propensa ad ascoltare la risposta. Zukav, invece, si è già risposto da sé, negativamente. Ma è completamente fuori strada, anche prendendo alla lettera la domanda. Infatti, da quando il suo libro è stato pubblicato, molte persone hanno visto gli atomi grazie al microscopio elettronico a scansione, che riprende delle bellissime immagini dei piccoli amici.

Per quanto riguarda Capra, egli è molto più furbo e va cauto con le ipotesi e il linguaggio, ma è un altro eretico. Insiste sul fatto che la «semplice immagine meccanicistica dei mattoni della materia» deve essere abbandonata. Comincia da ragionevoli esposizioni della fisica quantistica, e poi parte per la tangente costruendone elaborate estensioni che sono totalmente mancanti di quell'attento sostegno reciproco che devono darsi la teoria e l'esperimento e che tante lacrime e sangue costa allo scienziato militante.

Se le occasionali disattenzioni di questi autori mi disturbano, gli autentici ciarlatani mi fanno andare fuori dai gangheri. Libri come il *Tao* e il *Wu Li* rappresentano un rispettabile livello intermedio fra i

buoni libri di divulgazione scientifica e il settore degli impostori, dei ciarlatani e dei folli. Quelli che vi promettono vita eterna se vi sottoponete a una dieta a base di foglie di sommacco. Quelli che danno testimonianze di prima mano sulla visita degli extraterrestri. Quelli che spiegano gli errori della teoria della relatività sulla base della fisica prediluviana dell'*Almanacco di Frate Indovino*. Quelli che scrivono sul «New York Inquirer» e contribuiscono ad aumentare la quantità di lettere con cui strambi personaggi affliggono tutti gli scienziati più famosi. La maggior parte di questi sono personaggi innocui, come la vecchina settantenne che mi riferiva, in ottanta fitte pagine scritte a mano, la sua conversazione con omini verdi provenienti dallo spazio. Purtroppo altri non sono così innocui: un segretario di redazione della «Physical Review», una rivista scientifica, venne ammazzato da un tizio al quale era stata rifiutata la pubblicazione di un articolo delirante.

Io credo che il punto importante sia questo: tutte le discipline, tutte le professioni hanno un establishment, sia esso costituito dall'insieme degli anziani professori di fisica delle università più prestigiose, dai magnati del business del fast food, dai dirigenti dell'Associazione americana dell'ordine forense o dai soci anziani del Fraterno Ordine degli impiegati delle poste. Nella scienza, il cammino verso il progresso si accelera quando i giganti sono rovesciati. Perciò gli iconoclasti, ribelli intellettuali (armati di bombe teoriche), sono assai ricercati, perfino dallo stesso establishment. Naturalmente, a nessuno scienziato piace vedere la propria teoria buttata nel cestino della carta straccia, e qualcuno può anche reagire – momentaneamente e istintivamente – come l'establishment politico di fronte a una rivolta. Ma la tradizione per cui il destino di una teoria scientifica è quello di essere superata da una migliore, è troppo radicata. Far crescere e premiare il giovane creativo è un sacro obbligo dell'establishment scientifico (e, naturalmente, non è sufficiente essere giovani). Questa etica dell'apertura verso i giovani, gli eretici e i ribelli crea un varco per ciarlatani e pasticcioni, che possono approfittarsi di giornalisti, editori e altra gente dei media, scientificamente analfabeti e poco rigorosi. Alcuni imbroglioni hanno avuto un notevole successo, come il mago israeliano Uri Geller o lo scrittore Immanuel Velikovsky o perfino qualcuno con un dottorato (un dottorato è una garanzia di verità ancor meno che un premio Nobel) che ha propagandato cose fuori dal mondo come «mani che vedono», la «psicocinesi», il «creazionismo», la «poliacqua», la «fusione fredda» e molte altre idee fraudolente. In genere si proclama che la verità ri-

velata è stata soffocata dal perfido establishment, teso a preservare tutti i benefici e privilegi assicuratigli dallo *status quo*.

Certamente, può succedere. Ma, nella nostra disciplina, perfino i membri dell'establishment predicano contro l'establishment. Il nostro santo patrono, Richard Feynman, nel suo saggio *Che cos'è la scienza?* così ammoniva gli studenti: «Imparate che è vostro dovere dubitare degli esperti... Scienza è credere nell'ignoranza degli esperti». E più avanti: «Ogni generazione che scopra qualcosa dalla sua esperienza deve trasmetterlo alle generazioni future, ma deve farlo con un delicato equilibrio fra riverenza e irriverenza, di modo che la gioventù non debba portare un fardello troppo pesante di errori, ma riceva le verità rivelate insieme con la consapevolezza che potrebbero non essere verità».

Questo passaggio esprime eloquentemente quello che pensiamo tutti noialtri che abbiamo lavorato nel vigneto della scienza. Naturalmente, non tutti gli scienziati possiedono il senso critico, la miscela di passione e sensibilità che Feynman possedeva in misura eminente. Gli scienziati sono individui diversi l'uno dall'altro ed è anche vero che molti grandi scienziati si prendono troppo sul serio. Essi si trovano in difficoltà ad applicare il loro senso critico a se stessi o, peggio ancora, al lavoro dei ragazzi che li criticano. Nessuna disciplina è perfetta. Ma quello che è raramente compreso dal grande pubblico è quanto prontamente, ansiosamente, e con quanta aspettativa, la comunità scientifica nel suo complesso dia il benvenuto all'iconoclasta intellettuale, se lui o lei portano qualcosa di buono.

La tragedia in tutto questo non sono gli scrittori faciloni di pseudoscienza, o l'assicuratore di Wichita che sa perfettamente dove Einstein ha sbagliato e ci scrive sopra un libro, o l'imbroglione che direbbe qualsiasi cosa per far soldi (i Geller o i Velikovsky). È il danno fatto al pubblico credulone e scientificamente illetterato. Quel pubblico che reinveste gli utili in nuovi titoli a fini di speculazione, spende una fortuna per iniezioni di secrezioni di ghiandola di scimmia, mastica noccioli di albicocca, è disposto ad andare dovunque e a fare qualunque cosa per l'imbonitore che vende palliativi in nome della «scienza», una volta dal suo carro e ora che si è modernizzato dagli schermi di qualche canale televisivo.

Perché siamo così vulnerabili, dico noi, il pubblico? Una risposta possibile è che il grande pubblico si sente a disagio quando ha a che fare con la scienza, non ha familiarità con il modo in cui essa evolve e progredisce. Vede la scienza come un edificio monolitico di intoccabili regole e credenze e gli scienziati, grazie al ritratto di santoni

intoccabili in camice bianco che appare dai media, come dei vecchi, ottusi e arteriosclerotici difensori dello *status quo*. Ma la verità è che la scienza è qualcosa di molto più flessibile: non ha a che fare con la difesa dello *status quo*, è rivoluzionaria.

Clamori rivoluzionari

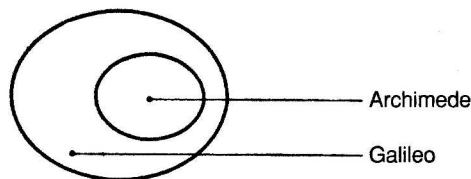
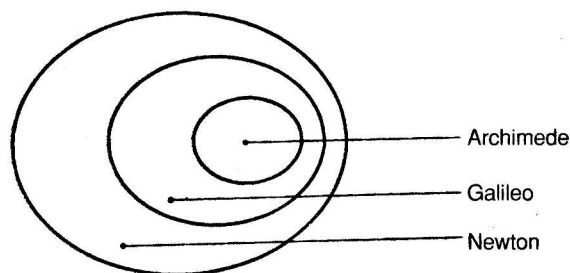
La teoria dei quanti è diventata un comodo specchietto per le allodole per coloro che la dichiarano parente di qualche sorta di religione o misticismo. La fisica classica newtoniana viene spesso dipinta come sicura, logica, intuitiva. La teoria dei quanti, controintuitiva e fantasmatica quale essa è, arriva e la «rimpiazza». È difficile da comprendere. È minacciosa. Una soluzione – la soluzione offerta in qualcuno dei libri di cui abbiamo parlato – è quella di pensarla come una sorta di religione. Perché non considerarla una forma di induismo (o buddismo, eccetera)? In questo modo possiamo semplicemente fare a meno della logica.

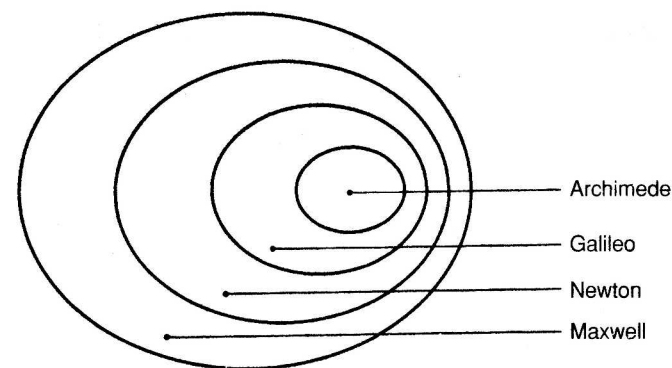
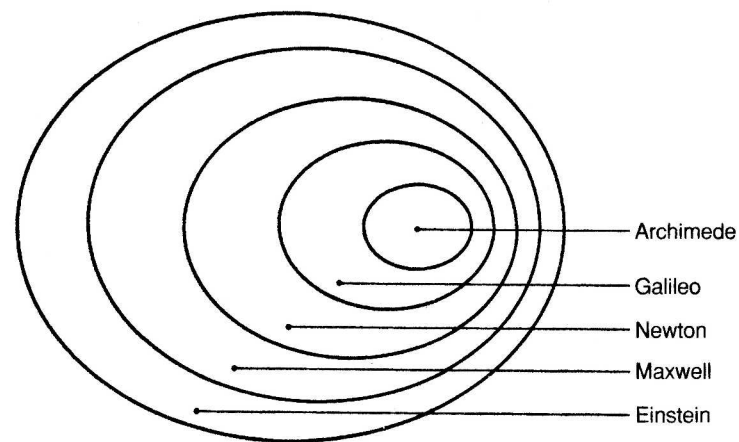
Un altro modo è quello di pensare che la teoria dei quanti sia, ebbene sì, scienza. E di non farsi prendere dall'idea che essa «rimpiazzi» quello che c'era prima. La scienza non getta via così, come carta straccia, idee vecchie di secoli, specialmente se esse hanno fatto un buon lavoro. Vale la pena fare una breve digressione per esplorare come accadano le rivoluzioni in fisica.

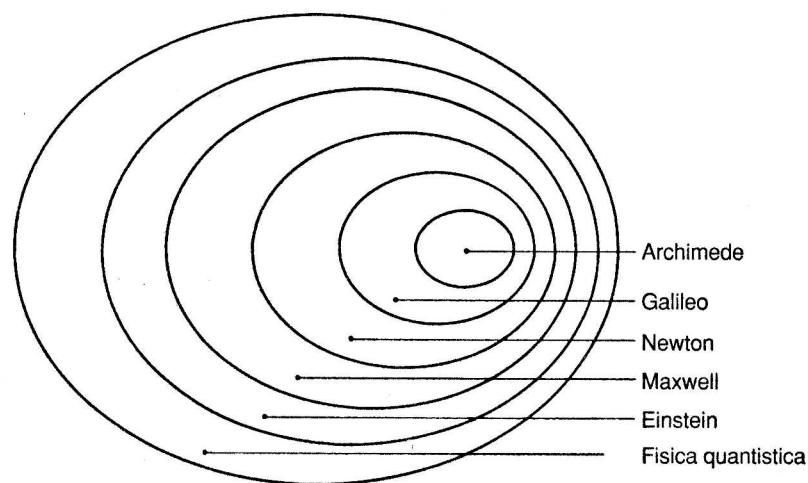
La nuova fisica non azzera necessariamente la vecchia. Le rivoluzioni in fisica tendono a essere conservative, per quanto si può, ed economiche. Esse possono avere sconvolgenti conseguenze filosofiche e può sembrare che rinneghino l'immagine invalsa di come funziona il mondo. Ma ciò che realmente succede è che questa viene estesa a un nuovo dominio.

Prendiamo il buon vecchio Archimede. Intorno al 200 a.C. egli compendia i principi della statica e dell'idrostatica. La statica è lo studio della stabilità di strutture come scale, ponti, archi, cose in genere che l'uomo ha costruito per rendersi la vita più confortevole. Il suo lavoro sull'idrostatica aveva invece a che fare con i liquidi e tutto ciò che galleggia e affonda, con ciò che è trascinato dalla corrente, con i principi della spinta in un liquido, insomma con tutto ciò che vi fa gridare «Eureka!» nella vasca da bagno. I principi di Archimede sono validi oggi come lo erano duemila anni fa.

Nel Seicento Galileo prese in esame le leggi della statica e dell'idrostatica, ma estese le misurazioni agli oggetti in movimento, oggetti che rotolano su piani inclinati, palle che cadono dalle torri, cor-

de di liuto con dei pesi che oscillano avanti e indietro nella bottega di musica del padre. La teoria di Galileo includeva quella di Archimede, ma spiegava molte più cose. In effetti, essa si estendeva alle caratteristiche della superficie lunare e fino alle lune di Giove. Galileo non abolì Archimede. Semplicemente lo assimilò. Se volessimo rappresentare questa relazione con una figura, dovrebbe essere così:

Newton andò ben oltre Galileo. Aggiungendo la causalità, fu in grado di esaminare il sistema solare e le maree. La sua sintesi incluse nuove misurazioni del moto dei pianeti e delle loro lune. Ma nulla nella rivoluzione newtoniana gettava dubbi sui contributi di Galileo e di Archimede: essa estendeva le regioni dell'universo soggette a questa grande sintesi.

Nel XVIII e nel XIX secolo, gli scienziati cominciarono a studiare un fenomeno che fuorusciva dal campo della normale esperienza. Fu chiamato elettricità. Con l'eccezione della spaventevole esperienza dei fulmini, i fenomeni elettrici dovettero essere prodotti artificialmente per essere studiati (proprio come certe particelle devono essere «fabbricate» nei nostri acceleratori). L'elettricità era allora qualcosa di esotico come lo sono oggi i quark. Lentamente, correnti e voltaggi, campi elettrici e magnetici furono compresi e anche manipolati e controllati. Le leggi dell'elettricità e del magnetismo furono estese e codificate da James Clerk Maxwell. Come Maxwell e poi Heinrich Hertz e Guglielmo Marconi e Charles Steinmetz e molti altri misero queste

idee in pratica, l'ambiente in cui viviamo cambiò. L'elettricità ci circonda, le comunicazioni ronzano nell'aria che respiriamo. Ma il rispetto che Maxwell nutriva per coloro che l'avevano preceduto era incrollabile.

Non era rimasto molto dopo Maxwell e Newton, o no? Einstein focalizzò la sua attenzione sui confini dell'universo newtoniano. Le sue idee andarono in profondità; certi aspetti delle assunzioni fatte da Galileo e Newton non lo convincevano, e alla fine arrivò a nuove assunzioni. Il dominio della sua teoria comprendeva ora oggetti che si muovevano a velocità straordinarie. Tali fenomeni erano irrilevanti per gli osservatori di prima del Novecento, ma non appena gli esseri umani esaminarono gli atomi, inventarono strumenti nucleari e cominciarono a curiosare nei primi istanti di vita dell'universo, la teoria di Einstein divenne importante.

La teoria della gravità di Einstein andò oltre quella di Newton, includendo la dinamica dell'universo (Newton credeva in un universo statico) e la sua espansione a partire da una catastrofe originaria. Eppure, quando le equazioni di Einstein sono applicate al mondo newtoniano, esse danno i medesimi risultati.

Adesso avevamo tutto il malloppo, no? No! Dovevamo ancora guardare dentro l'atomo, e quando lo facemmo, ci trovammo ad aver bisogno di concetti che andavano ben oltre Newton (ed erano inaccettabili per Einstein), che ci avrebbero condotto dentro l'atomo, dentro il nucleo e, per quanto ne sappiamo, oltre (ancora dentro?). Avevamo bisogno della fisica quantistica. Eppure, nulla nella rivoluzione quantistica sbanca Archimede, svende Galileo, mette Newton alla berlina, spiazza la relatività di Einstein. Piuttosto, un nuovo dominio è stato intravisto, nuovi fenomeni sono stati incontrati. La scienza di Newton si era rivelata insufficiente, e con il tempo una nuova sintesi fu fatta.

Ricorderete come, nel capitolo V, si sia detto che l'equazione di Schrödinger era stata inventata per trattare elettroni e altre particelle, ma che, quando applicata a palle da baseball e altri grandi oggetti, si trasformava sotto i nostri occhi nella formula di Newton $F = ma$, o pressappoco. L'equazione di Dirac, quella che prevedeva l'antimateria, era un «raffinamento» dell'equazione di Schrödinger, destinato a trattare elettroni «veloci», che si muovono a una velocità prossima a quella della luce. Eppure, quando l'equazione di Dirac viene applicata a elettroni che si muovono lentamente, salta fuori... l'equazione di Schrödinger, ma che questa volta, come per magia, include lo spin dell'elettrone. Si butta forse via Newton? Niente affatto.

Se questo cammino del progresso vi sembra meravigliosamente efficiente, bisogna sottolineare che ci sono anche molti sprechi. Quando nuove aree d'osservazione si aprono alla nostra inventività e alla nostra insaziabile curiosità (e anche insaziabile fame di fondi di ricerca), i dati stimolano normalmente una cornucopia di idee, teorie, ipotesi, la maggior parte delle quali sono sbagliate. Nella corsa per il Far West delle idee c'è un solo vincitore. I perdenti finiscono in quel deposito di detriti che sono le note dei libri di storia della scienza.

Come succede una rivoluzione? In tutti i periodi di calma intellettuale, come fu la fine del secolo scorso, ci sono sempre dei fenomeni «non ancora spiegati». Ci sono sempre scienziati sperimentali che sperano che le loro osservazioni uccideranno la teoria regnante. Allora una teoria migliore prenderà il suo posto e la loro fortuna accademica sarà fatta. Molto spesso, o le misurazioni sono sbagliate o una più astuta applicazione della teoria regnante finisce per essere in grado di spiegare i dati. Ma non sempre. Dato che ci sono sempre tre possibilità – (1) i dati sono sbagliati, (2) la vecchia teoria resiste, e (3) c'è bisogno di una nuova teoria – è l'esperimento che fa della scienza un mestiere molto poco noioso.

Quando succede una rivoluzione, essa estende il dominio della scienza e può anche avere una profonda influenza sulla nostra visione del mondo. Un esempio: Newton non solo creò la legge della gravitazione universale, ma anche una filosofia deterministica che indusse i teologi a dare a Dio un nuovo ruolo. Le regole newtoniane stabilirono delle equazioni matematiche che determinavano il futuro di qualsiasi sistema, data la conoscenza delle condizioni iniziali. Per contrasto, la fisica quantistica, applicabile al mondo degli atomi, addolcisce la visione deterministica del mondo, concedendo alle singole particelle i piaceri dell'incertezza. In effetti, nuovi sviluppi hanno mostrato come, anche fuori dal mondo subatomico, l'ordine deterministico newtoniano sia un'idealizzazione eccessiva. La complessità del mondo macroscopico è così rilevante per molti sistemi, che il più minuscolo cambiamento nelle condizioni iniziali produce enormi cambiamenti nell'effetto finale. Sistemi così apparentemente semplici come una cascata o un paio di pendoli dondolanti esibiscono un comportamento «caotico». La scienza della dinamica non lineare, del «caos», ci dice che il mondo reale non è così deterministico come si pensava una volta.

Tutto questo non significa che la scienza e le religioni orientali abbiano tutt'a un tratto scoperto di avere un sacco di cose in comune. Se le metafore religiose impiegate nei libri che confrontano la nuova fisica con il misticismo orientale vi servono in qualche modo per introdurvi alla moderna rivoluzione fisica, allora usatele. Ma ricordate che le metafore sono solo metafore. Sono solo delle mappe poco dettagliate e, per usare un vecchio modo di dire, la mappa non è il territorio. La fisica e la religione sono due cose distinte. Se non lo fossero, sarebbe molto più facile per noi scienziati tirar su finanziamenti.

VI

Gli acceleratori: frantumano atomi, vero?

Senatore John Pastore: Esiste in prospettiva, connessa con questo acceleratore, una qualsiasi cosa che sia in qualche modo vantaggiosa per la sicurezza di questa nazione?
Robert R. Wilson: No signore. Non credo.
Pastore: Nulla di nulla?
Wilson: Nulla di nulla.
Pastore: Non è di alcun valore, al rispetto?
Wilson: È vantaggiosa per il rispetto che portiamo gli uni agli altri, la dignità dell'uomo e il nostro amore per la cultura. Ha a che fare con la questione se siamo buoni pittori, buoni scultori, grandi poeti. Voglio dire, con tutte quelle cose che stimiamo e onoriamo veramente nel nostro paese e per le quali vale la pena essere patriottici. Non ha niente a che fare direttamente con la difesa nazionale, a parte rendere il nostro paese degno di essere difeso.

Abbiamo una tradizione, qui al Fermilab. Ogni primo di giugno, faccia pioggia o sole, alle sette del mattino il personale è invitato a correre per gli oltre sei chilometri dell'anello principale dell'acceleratore, sopra il quale si estende una strada che è affiancata da una pista per jogging. Si corre sempre nella stessa direzione in cui gli antiprotoni vengono accelerati. Il mio ultimo tempo, ufficioso, è stato di 38 minuti. L'attuale direttore del Fermilab, il mio successore John Peoples, ha diffuso una nota, la prima estate che ha trascorso in quella carica, che invitava il personale a correre il primo di giugno con «un più giovane e più veloce direttore». Più rapido lo è, ma nessuno di noi due lo è abbastanza per battere gli antiprotoni. Essi completano il circuito in circa 22 milionesimi di secondo, il che significa che un antiprotone mi doppia circa 100 milioni di volte!

Il personale del Fermilab continua a essere umiliato dagli antiprotoni. Andiamo in pari, però, perché siamo noi a realizzare gli esperimenti, e a far fare agli antiprotoni dei tremendi frontali con protoni che viaggiano altrettanto veloci in direzione opposta. Il processo di collisione delle particelle è l'argomento di questo capitolo.

La nostra discussione sugli acceleratori sarà il punto di partenza di un nuovo viaggio. Finora abbiamo viaggiato come treni attraverso secoli e secoli di progresso scientifico. Adesso rallenteremo e parleremo non tanto di scoperte e di scienziati quanto di macchine. Il miglioramento degli strumenti è sempre stato inestricabilmente connesso al

progresso delle teorie, dal piano inclinato di Galileo alla camera a scintille di Rutherford. Ma ora uno strumento diventa il protagonista. Non è possibile comprendere la fisica degli ultimi decenni senza capire che cosa siano un acceleratore e la sua corte di rivelatori di particelle, gli strumenti che hanno tenuto banco negli ultimi quarant'anni in questa disciplina. Imparando che cosa sia un acceleratore, si impara un sacco di fisica, perché questa macchina materializza molti principi che i fisici hanno faticato per secoli a perfezionare.

A volte penso alla torre di Pisa come al primo acceleratore di particelle, un acceleratore lineare (quasi) verticale, che Galileo usò per i suoi esperimenti. La vera storia comincia però molto dopo. Lo sviluppo dell'acceleratore ha origine dal nostro desiderio di entrare dentro l'atomo. Galileo a parte, la storia comincia con Ernest Rutherford e i suoi allievi, che divennero dei maestri nell'arte di sfruttare le particelle alfa per esplorare l'atomo.

La particella alfa è un dono del cielo. Quando certi materiali naturalmente radioattivi si disintegrano spontaneamente, sparano fuori queste pesanti particelle cariche d'energia. Una particella alfa possiede un'energia di 5 milioni di elettronvolt. Un elettronvolt (eV) è la quantità d'energia che un singolo elettrone riceve quando viene mandato dal contenitore (polo negativo) di una batteria per flash da 1 volt al terminale della batteria stessa (polo positivo). Per quando avrete finito di leggere i prossimi due capitoli, l'elettronvolt vi sarà diventato familiare come il centimetro, la caloria o il megabyte.

Ci sono quattro abbreviazioni che dovete conoscere prima di andare avanti:

KeV: mille elettronvolt (K sta per kilo)
MeV: un milione di elettronvolt (M sta per mega)
GeV: un miliardo di elettronvolt (G sta per giga)
TeV: un trilione (mille miliardi) di elettronvolt (T sta per tera)

Oltre TeV ricorriamo alla notazione tramite le potenze di dieci, e 10^{12} eV sta per esempio a significare un TeV. Oltre 10^{14}, la nostra tecnologia futuribile fa bancarotta, e siamo nel dominio delle particelle dei raggi cosmici, che bombardano la Terra dallo spazio profondo. I numeri delle particelle cosmiche sono piccoli, ma le loro energie arrivano a 10^{21} eV.

Per la fisica delle particelle, 5 MeV non è molto. Le alfa di Rutherford riuscivano appena appena a rompere il nucleo di un atomo d'azoto in quella che fu forse la prima collisione nucleare provocata intenzionalmente. Da queste collisioni emerse solamente uno stuzzichino, in confronto a quello che c'era da imparare. La teoria dei quanti ci dice che più piccolo è l'oggetto da studiare, più grande l'energia che serve, l'equivalente di affilare il coltello di Democrito. Per affettare il nucleo abbiamo bisogno di energie pari a molte decine o anche centinaia di MeV. Quanto più, tanto meglio.

L'Onnipotente improvvisa?

Una piccola digressione filosofica. Per come descriverò la faccenda, apparirà che i fisici delle particelle costruiscano allegramente acceleratori sempre più potenti spinti da quelle stesse ragioni che spingono noi della specie *Homo sapiens* a fare qualunque cosa: curiosità, narcisismo, sete di potere, invidia, ambizione... Anche così, capita spesso che un gruppetto di noialtri, seduti tranquillamente davanti a una birra, si ritrovi a speculare se Lei, l'Onnipotente in persona sappia che cosa uscirà dalla nostra prossima macchina, per esempio il «mostro» da 30 GeV che era quasi completato nel 1959 a Brookhaven. Stiamo forse costruendo noi stessi degli enigmi per la natura, raggiungendo queste nuove, inaudite energie? Forse che l'Onnipotente, non sapendo bene come comportarsi, sbircia dietro le spalle di Gell-Mann o di Feynman o di un altro dei Suoi teorici preferiti per vedere che fare a queste enormi energie? Oppure raduna un comitato di scienziati angelici – Newton, Einstein, Maxwell – per suggerire che cosa dovrebbe fare un'energia di 30 GeV? Un tale punto di vista è a volte incoraggiato dalla constatazione che la storia delle teorie procede a salti, come se Lei improvvisasse man mano che si va avanti. Ma i progressi fatti in astrofisica e nella ricerca sui raggi cosmici ci rassicurano prontamente: si tratta di deliri del venerdì sera, giusto prima del meritato riposo del fine settimana. I nostri colleghi che stanno a naso in su ci garantiscono che nell'universo 30 GeV, 300 GeV, perfino 3 miliardi di GeV sono robetta di tutti i giorni. Lo spazio trabocca di particelle dotate di energie con cifre astronomiche (appunto), e quello che oggi è un evento raro ed esotico in una collisione di dimensioni infinitesimali a Long Island o a Batavia o sul monte Tsukuba, era invece, subito dopo la nascita dell'universo, un evento comune e normale come una festicciola in giardino.

E adesso torniamo alle macchine.

Perché tanta energia?

L'acceleratore più potente al giorno d'oggi, il Tevatron del Fermilab, produce collisioni a un'energia di circa 2 TeV, ovvero 400.000 volte l'energia creata dalle collisioni delle particelle alfa di Rutherford. Il Super Collisore Superconduttore ancora da costruire è progettato per operare con energie di circa 40 TeV.

Ora, 40 TeV suona come una bella quantità d'energia, e in effetti lo è quando viene impiegata in una singola collisione fra due particelle. Ma bisogna anche vederla in prospettiva. Quando accendiamo un fiammifero, nella reazione sono coinvolti circa 10^{21} atomi, e ciascun processo rilascia circa 10 eV, di modo che l'energia totale è di circa 10^{22} eV, circa 10 miliardi di TeV. Nel Super Collisore ci saranno 100 milioni di collisioni al secondo, e ciascuna di esse rilascerà 40 TeV, per un totale di 4 miliardi di TeV, non molto differente dall'energia rilasciata accendendo un fiammifero! Il trucco sta nel fatto che qui l'energia è concentrata in poche particelle, invece che dispersa nei miliardi e miliardi e miliardi di particelle contenute in ogni pezzettino di materia visibile.

Possiamo guardare al complesso dell'acceleratore nel suo insieme – dalla centrale a gasolio attraverso le linee elettriche fino al laboratorio dove i trasformatori mandano l'energia ai magneti e alle cavità a radiofrequenza – come a un gigantesco dispositivo per concentrare, in maniera molto poco efficiente, l'energia chimica del gasolio in un mucchietto inconcepibilmente piccolo di un miliardo (o giù di lì) di protoni al secondo. Se la quantità macroscopica di gasolio potesse essere riscaldata fino al punto in cui ciascuno dei suoi atomi costituenti avesse 40 TeV, la temperatura sarebbe di 4×10^{17} gradi (in gradi della scala Kelvin, quattrocento milioni di miliardi). Gli atomi fonderebbero nei quark che li compongono. Tale era lo stato dell'intero universo meno di un milionesimo di miliardesimo di secondo dopo la creazione.

Allora, che ce ne facciamo di tutta questa energia? La teoria dei quanti vuole acceleratori sempre più potenti per studiare cose sempre più piccole. La tabella nella pagina accanto riporta le energie approssimate delle quali abbiamo bisogno per rompere svariate interessanti strutture.

Notate come sia possibile prevedere di quanto debba aumentare l'energia richiesta man mano che le dimensioni si rimpiccioliscono. Notate anche come ci voglia solo 1 eV per studiare gli atomi, ma 10 miliardi di eV per cominciare a studiare i quark.

Energia (approssimata)	*Dimensioni della struttura*
0,1 eV	Molecola, grande atomo, 10^{-8} metri
1 eV	Atomo, 10^{-9} m
1000 eV	Nocciolo atomico, 10^{-11} m
1 MeV	Nucleo grasso, 10^{-14} m
100 MeV	Nocciolo nucleare, 10^{-15} m
1 GeV	Neutrone o protone, 10^{-16} m
10 GeV	Effetti quark, 10^{-17} m
100 GeV	Effetti quark, 10^{-18} m (più dettagli)
10 TeV	Particella di Dio?, 10^{-20} m

Gli acceleratori sono come i microscopi usati dai biologi per studiare cose anche più piccole. I normali microscopi usano la luce per illuminare la struttura dei globuli rossi, per esempio. I microscopi elettronici, tanto amati dai cacciatori di microbi, sono più potenti proprio perché l'energia degli elettroni è maggiore di quella della luce nei microscopi ottici. La lunghezza d'onda minore permette ai biologi di «vedere» le molecole del corpuscolo. È la lunghezza d'onda dell'elemento che «bombarda» che determina le dimensioni di ciò che si può «vedere» e studiare. Dalla teoria dei quanti sappiamo che la lunghezza d'onda diminuisce man mano che l'energia cresce; la nostra tabella semplicemente mostra questa connessione.

In un discorso alla Royal Society nel 1927, Rutherford espresse la speranza che un giorno gli scienziati trovassero un modo per accelerare particelle cariche a energie più alte di quelle fornite dal decadimento radioattivo. Egli presagì l'invenzione di macchine capaci di generare molti milioni di volt. C'era un motivo per volere queste macchine, oltre alla sete di potere. I fisici avevano bisogno di poter scagliare più proiettili contro un dato bersaglio. Le particelle alfa fornite dalla natura non erano molto abbondanti: meno di un milione al secondo poteva essere diretto contro un bersaglio di un centimetro quadrato. Un milione può sembrare molto, ma i nuclei occupano solo centimilionesimo dell'area del bersaglio. Per attaccare il nucleo c'è bisogno di un numero almeno mille volte maggiore di particelle accelerate (un miliardo) e, come già detto, di molta più energia, molti milioni di volt (i fisici non erano nemmeno sicuri di quanti milioni). Sembrava una missione impossibile nei tardi anni Venti, ma i fisici si misero al lavoro in molti centri di ricerca. Quella che seguì fu una corsa a realizzare macchine che avrebbero accelerato l'enorme numero di particelle richiesto ad almeno un milione di volt. Prima di parlare dei progressi effettuati nella tecnologia degli acceleratori, dobbiamo però fornire le basi.

Il gap

La fisica dell'acceleratore di particelle è facile da spiegare (aspettate, lo è davvero!). Collegate i terminali di una pila a lunga durata a due placche di metallo (chiamate anche terminali), messe a trenta centimetri circa di distanza l'una dall'altra. Questa sistemazione è chiamata «gap». Sigillate i due terminali in un recipiente completamente privo d'aria. Arrangiate il tutto in modo che una particella carica elettricamente – elettroni e protoni sono i primi candidati – possa muoversi liberamente attraverso il gap. Un elettrone carico negativamente correrà allegramente verso il terminale positivo, guadagnando un'energia di (guardate l'etichetta della pila) 12 eV. Perciò il gap produce un'accelerazione. Se il terminale metallico positivo è fatto di uno schermo di fili invece che di una solida placca, la maggior parte degli elettroni passerà attraverso di esso, creando un fascio diretto di elettroni a 12 eV. Un elettronvolt è una quantità molto piccola d'energia. Ciò di cui abbiamo bisogno è una pila da un miliardo di volt, ma ai grandi magazzini una cosa così non la vendono. Per ottenere alti voltaggi bisogna andare oltre i marchingegni chimici. Ma il meccanismo di base resta lo stesso – il gap, attraverso il quale le particelle acquistano energia – non importa se stiamo parlando della macchina di Cockcroft e Walton del 1930 o degli ottantasette chilometri di circonferenza del Super Collisore.

L'acceleratore prende normali particelle, obbedienti alle leggi fisiche, e dà loro energia extra. Da dove prendiamo le particelle? Per gli elettroni è facile. Portiamo un filo elettrico all'incandescenza e gli elettroni saltano fuori. Anche per i protoni è facile. Il protone è il nucleo dell'atomo di idrogeno (i nuclei di idrogeno non hanno neutroni), di modo che tutto ciò di cui abbiamo bisogno è del gas di idrogeno che si trova in commercio. Altre particelle possono essere accelerate, ma devono essere stabili – vale a dire avere lunghi tempi di vita – perché il processo di accelerazione richiede tempo. E devono essere cariche elettricamente, dal momento che il gap non funzionerebbe, è ovvio, con una particella neutra. I migliori candidati per l'accelerazione sono protoni, antiprotoni, elettroni e positroni (antielettroni). Nuclei più pesanti come i deuteroni e le particelle alfa possono pure essere accelerati, e hanno i loro speciali impieghi. Una macchina fuori del comune in costruzione a Long Island accelererà nuclei di uranio a miliardi di elettronvolt.

Il «ponderatore»

Che cosa fa il processo di accelerazione? Una facile ma incompleta risposta è che accelera le fortunate particelle. Nei tempi eroici degli acceleratori questa spiegazione sarebbe andata bene. Una descrizione migliore dice che esso accresce l'*energia* delle particelle. Come gli acceleratori divennero più potenti, essi furono presto in grado di raggiungere velocità prossime al tetto: la velocità della luce. La teoria della relatività speciale del 1905 di Einstein dice che nulla può viaggiare più veloce della luce. A causa della relatività, la «velocità» non è un concetto molto utile. Per esempio, una macchina può accelerare i protoni fino al 99% della velocità della luce, mentre una macchina molto più costosa, costruita dieci anni più tardi, può raggiungere il 99,9%. Un affarone. Andate a spiegarlo ai membri del Congresso che hanno stanziato quel mucchio di soldi per ottenere un bello 0,9% in più!

Non è la velocità che affila il coltello di Democrito e che apre nuovi campi d'osservazione. È l'energia. Un protone al 99% della velocità della luce ha un'energia di circa 7 GeV (il Bevatron di Berkeley del 1955), mentre un protone al 99,95% raggiunge i 30 GeV (la macchina AGS di Brookhaven del 1960) e un protone al 99,999% i 200 GeV (Fermilab, 1972). Perciò, la relatività di Einstein, che governa i cambiamenti di velocità ed energia, rende inutile parlare di velocità. Ciò che importa è l'energia. Una proprietà a essa relazionata è il momento, che, per una particella ad alti regimi energetici, può essere considerato come energia direzionale. Incidentalmente, la particella accelerata diventa anche più pesante a causa di $E = mc^2$. Per la relatività, una particella a riposo ha un'energia data da $E = m_0c^2$, dove m_0 è definita come la «massa a riposo» della particella. Quando la particella viene accelerata cresce la sua energia, E, e dunque la sua massa. Quanto più ci avviciniamo alla velocità della luce, tanto più pesante diventa l'oggetto, e di conseguenza più difficile diventa aumentare la sua velocità. Ma l'energia continua a crescere. La massa di un protone a riposo è di circa 1 GeV, come si conviene. La massa di un protone a 200 GeV è più di duecento volte quella del protone che si sta riposando nella bottiglia di gas di idrogeno. Il nostro acceleratore è in realtà un «ponderatore».

La cattedrale di Monet, ovvero tredici modi di guardare un protone

Come usiamo queste particelle? Per dirla semplicemente, le spingiamo a fare collisioni. Poiché questo è il processo fondamentale da cui impariamo qualcosa a proposito della materia e dell'energia,

dobbiamo entrare nei dettagli. Potete dimenticare i particolari circa il funzionamento delle macchine e su come le particelle vengono accelerate, anche se sono interessanti, ma non dimenticate questo: che la cosa fondamentale dell'acceleratore è la collisione.

La nostra tecnica per osservare e possibilmente capire il mondo subnucleare è simile al modo in cui capiamo qualsiasi cosa, un albero, per esempio. Qual è il processo? Per prima cosa, abbiamo bisogno di luce. Usiamo quella del sole. I fotoni provenienti dal sole sciamano verso l'albero e vengono riflessi dalle foglie e dalla corteccia, da rami e rametti, e una frazione di questi fotoni viene catturata dalle nostre pupille. Potremmo dire che i fotoni vengono dispersi in direzione di un apparecchio capace di captarli. Le lenti dell'occhio focalizzano la luce sulla retina posta sul retro del bulbo oculare. La retina trattiene i fotoni e discrimina fra le varie qualità: colore, ombreggiatura, intensità. Questa informazione viene combinata e inviata a un processore in linea, il lobo occipitale del cervello, che è specializzato nell'elaborazione dei dati visivi. Alla fine, un altro processore non collegato in linea arriverà a una conclusione: «Per Giove, un albero! Quant'è bello».

L'informazione che arriva all'occhio può essere, in aggiunta alla distorsione che produce l'occhio stesso, filtrata attraverso lenti da vista o da sole. Tocca al cervello correggere queste distorsioni. Rimpiazziamo l'occhio con una macchina fotografica, e una settimana più tardi si potrà vedere l'albero, con un ancor più alto grado di astrazione, in una diapositiva proiettata su uno schermo. Oppure una videocamera può convertire i dati forniti dai fotoni in informazione digitale: una serie di zero e di uno. Poi si riversa in un apparecchio TV, che riconverte l'informazione digitale in informazione analogica, e un albero appare sullo schermo. Se si volesse mandare «un albero» ai nostri colleghi scienziati del pianeta Ugiza, l'informazione digitale potrebbe non essere di nuovo convertibile in informazione analogica, ma nondimeno continuerebbe a convogliare, con la massima precisione, la configurazione che noi terrestri chiamiamo albero.

Naturalmente, le cose non sono così semplici in un acceleratore. Differenti tipi di particelle vengono usati in modi diversi. Possiamo però usare ancora un poco la metafora dell'albero: esso ha un aspetto diverso la mattina, a mezzogiorno, al tramonto. Chiunque abbia visto i quadri di Monet che raffigurano la facciata della cattedrale di Rouen a ore differenti del giorno sa che differenza fa una diversa qualità della luce. Qual è la vera immagine? Per l'artista non c'è: ciascuna immagine è reale: l'indefinito chiarore del mattino, i netti contrasti della luce del mezzogiorno, i colori fiammeggianti del tramonto. Sotto ciascuna di queste luci si mostra un diverso aspetto della realtà. I fisici lavorano allo stesso modo. Noi abbiamo bisogno di tutta l'informazione che possiamo ottenere. L'artista impiega la luce cangiante del sole. Noi impieghiamo differenti particelle: un fascio di elettroni, oppure uno di muoni o di neutrini, a energie cangianti.

La cosa funziona così.

Ciò che si *conosce* di una collisione subatomica è quello che entra e quello che ne esce, e come ne esce. Che cosa succede in quel minuscolo volume in cui essa si produce? La dannata verità è che non possiamo vederlo. È come se la collisione avvenisse dentro una scatola nera. I dettagli meccanici della collisione non sono osservabili – e nemmeno minimamente immaginabili – nel fantasmatico mondo dei quanti. Quello che abbiamo è un modello delle forze in gioco e della struttura degli oggetti che collidono, qualora ciò sia rilevante. Vediamo quello che entra e quello che esce e ci chiediamo se quello che vediamo sia prevedibile sulla base del nostro modello di ciò che c'è all'interno della scatola.

In un programma educativo per bambini di dieci anni che abbiamo al Fermilab, proponiamo il seguente problema. Diamo loro una scatola quadrata vuota da guardare, scuotere, pesare. Poi mettiamo in essa a loro insaputa qualcosa, come una barra di legno o tre palline d'acciaio, e chiediamo di soppesarla di nuovo, agitarla e dirci tutto quello che possono circa gli oggetti in essa contenuti: dimensioni, forma, peso... È un'istruttiva metafora dei nostri esperimenti. Sareste sorpresi nel sapere quanto spesso i bambini ci azzecchino.

Torniamo agli adulti e alle particelle. Supponiamo che si voglia conoscere la dimensione dei protoni. Seguiamo il suggerimento di Monet e li guardiamo sotto diverse forme di «luce». Potrebbero essere dei punti? Per saperlo, i fisici colpiscono un protone con un altro protone a energie molto basse per esplorare la forza elettromagnetica fra i due oggetti dotati di carica. La legge di Coulomb dice che questa forza si estende all'infinito, decrescendo in intensità in ragione del quadrato della distanza. Il protone bersaglio e il protone accelerato sono, naturalmente, ambedue carichi positivamente, e poiché cariche simili si respingono, il protone accelerato viene prontamente respinto dal protone bersaglio, e i due non si avvicineranno mai molto. Sotto questo tipo di «luce», il protone sembra in effetti un punto, un punto di carica elettrica. Allora aumentiamo l'energia dei protoni accelerati. Adesso le deviazioni nella traiettoria dei protoni

indicano che essi penetrano abbastanza in profondità per toccare quella che è chiamata la forza (o interazione) forte, quella forza che adesso sappiamo tenere insieme i costituenti dei protoni. La forza forte è cento volte più intensa della forza elettrica di Coulomb ma, al contrario di quest'ultima, il suo raggio d'azione non è affatto infinito. Essa si estende solo fino a una distanza di circa 10^{-13} centimetri, e poi svanisce rapidamente.

Aumentando l'energia della collisione, portiamo alla luce sempre maggiori dettagli sulla forza forte. E come l'energia cresce, la lunghezza d'onda dei protoni diminuisce (ricordate de Broglie e Schrödinger). Minore è la lunghezza d'onda, come abbiamo visto, maggiore la quantità di dettagli discernibili nella particella studiata.

Alcune delle migliori «immagini» del protone vennero ottenute negli anni Cinquanta da Robert Hofstadter dell'Università di Stanford. La «luce» usata era un fascio di *elettroni* invece che di protoni. Il gruppo di ricerca di Hofstadter puntò un fascio di elettroni a 800 MeV contro un piccolo recipiente di idrogeno liquido. Gli elettroni bombardarono i protoni dell'idrogeno uscendo dal recipiente dispersi in varie traiettorie, che avevano una precisa relazione con il loro moto originario. Una cosa non tanto diversa da quello che faceva Rutherford, ricordate? A differenza del protone, l'elettrone non reagisce alla forza nucleare forte. Esso reagisce solo alla carica elettrica del protone, di modo che gli scienziati di Stanford furono in grado di esplorare la forma della distribuzione della carica nel protone, e questa avrebbe rivelato le dimensioni dello stesso. Apparve chiaramente che non era un punto. Il raggio fu misurato essere circa $2{,}8 \times 10^{-13}$ centimetri, con la carica concentrata nel centro di quello che chiamiamo un protone. Risultati simili furono ottenuti ripetendo gli esperimenti con fasci di muoni, anch'essi insensibili all'interazione forte. Per questa sua «fotografia» del protone, Hofstadter fu insignito nel 1961 del premio Nobel.

Nel 1968 i fisici dello Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) bombardarono i protoni con elettroni a energie molto più alte – da 8 a 15 GeV – e ottennero delle traiettorie di dispersione molto diverse. Sotto questa «luce», il protone presentava un'immagine molto differente. Gli elettroni a energia relativamente bassa di Hofstadter erano in grado di far vedere solamente un protone «a macchia», una levigata distribuzione della carica che lo faceva sembrare una piccola soffice pallina. Gli elettroni dello SLAC entrarono più in profondità e trovarono dei piccoli oggetti che ruotavano dentro il protone. Questo fu il primo indizio dell'esistenza dei quark. I nuovi dati e quelli vecchi non erano in contraddizione fra loro – come i dipinti mattutini e serotini di Monet – ma gli elettroni a bassa energia potevano rivelare solo la media della distribuzione della carica. La visualizzazione offerta da elettroni a più alta energia mostrava che il nostro protone contiene tre costituenti puntiformi che si muovono rapidamente. Perché l'esperimento dello SLAC mostrava questo dettaglio, mentre quello di Hofstadter no? Una collisione a energia abbastanza alta (determinata dagli elementi in entrata e quelli in uscita) «congela» i quark dove si trovano e «sente» la forza puntiforme. È ancora uno dei pregi delle lunghezze d'onda minori. Questa forza induce un ampio angolo di dispersione (ricordate Rutherford e il nucleo) e grandi alterazioni d'energia. Il nome tecnico per questo fenomeno è «dispersione profonda anelastica». Nei primi esperimenti di Hofstadter, il moto dei quark restava confuso e i protoni sembravano privi di discontinuità al loro interno a causa della bassa energia degli elettroni che vi penetravano. Immaginate di scattare una fotografia di tre piccole lampadine che vibrano rapidamente usando un tempo di esposizione di un minuto: la pellicola mostrerebbe un unico grosso e confuso oggetto luminoso. L'esperimento dello SLAC, per dirla alla buona, usava un tempo di esposizione minore, riuscendo a distinguere i punti luminosi tanto da poterli contare.

Poiché l'interpretazione che attribuiva all'esistenza dei quark il fenomeno della «dispersione profonda anelastica» è di straordinaria importanza, questi esperimenti vennero ripetuti al Fermilab e al CERN (Comitato europeo per la ricerca nucleare), usando muoni con un'energia pari a dieci volte quella dello SLAC (150 GeV) e anche neutrini. I muoni, come gli elettroni, servono per sondare la struttura elettromagnetica del protone, invece i neutrini, insensibili sia alla forza elettromagnetica sia all'interazione nucleare forte, servono a sondare quella che è chiamata la distribuzione dell'interazione debole, che è la forza nucleare responsabile, fra le altre cose, del decadimento radioattivo. Questi imponenti esperimenti, condotti in accesa competizione fra i vari centri di ricerca, condussero tutti alla medesima conclusione: il protone è fatto di tre quark. E apprendemmo anche alcune cose su come si muovono i quark: è il loro moto che definisce ciò che noi chiamiamo «protone».

Una dettagliata analisi di tutti i tre tipi di esperimenti – con elettroni, muoni e neutrini – portò anche a scoprire un nuovo tipo di particella, il gluone. I gluoni sono i portatori dell'interazione forte, e senza ammettere la loro esistenza i dati sperimentali non potevano essere spiegati. La stessa analisi diede dettagli quantitativi circa il

modo in cui i quark ruotano uno attorno all'altro nella loro prigione protonica. Vent'anni di tali studi (il loro nome tecnico è studio delle funzioni di struttura) ci hanno dato un sofisticato modello di tutti quegli esperimenti di collisione in cui protoni, neutroni, elettroni, muoni e neutrini, così come fotoni, pioni e antiprotoni, vengono scagliati contro i protoni. È Monet con qualcosa in più. Forse il paragone con la poesia di Wallace Stevens «Tredici modi di guardare un merlo» sarebbe più appropriato.

Come potete constatare, noi impariamo molte cose per poter render conto di quello che entra e di quello che esce da una collisione. Arriviamo a conoscere le forze e come esse risultino in strutture complesse come i protoni (fatti di tre quark) e i mesoni (fatti di un quark e di un antiquark). Con tale e tanta informazione complementare, diventa sempre meno importante vedere direttamente che cosa succede dentro la scatola nera.

Non si può fare a meno di restare impressionati da questa serie di scatole cinesi. La molecola è fatta di atomi. Il nocciolo di un atomo è il nucleo. Il nucleo è fatto di protoni e neutroni. Il protone e il neutrone sono fatti di quark. I quark sono fatti di... oops, fermi lì. I quark non sono divisibili, almeno crediamo, ma non ne siamo sicuri. Come possiamo arrischiarci a dire di essere arrivati alla fine del cammino? Nondimeno, oggi come oggi esiste un consenso nella comunità scientifica, e, dopotutto, Democrito non può essere eterno.

Nuova materia: alcune ricette

Non abbiamo ancora discusso di un importante processo che può aver luogo durante una collisione. Possiamo produrre nuove particelle. Ciò accade in casa nostra tutti i momenti. Considerate la lampada che illumina questa pagina. Qual è la fonte della luce? Sono gli elettroni, agitati dall'energia elettrica che corre per il filamento della lampadina o, se contribuite al risparmio energetico, nel gas di una lampada fluorescente. Gli elettroni *emettono fotoni*. È così che funziona. Nel linguaggio più esotico del fisico delle particelle, l'elettrone può, nel corso di una collisione, irradiare un fotone. L'energia viene fornita all'elettrone da un processo di accelerazione (per mezzo della presa sul muro).

Adesso dobbiamo generalizzare. Nel processo di creazione di una nuova particella, dobbiamo rispettare le leggi della conservazione dell'energia, del momento, della carica e tutte le altre regole quantistiche. Inoltre, l'oggetto che è in qualche modo responsabile

della creazione di una nuova particella deve essere «connesso» con la particella da creare. Per esempio: un protone collide con un altro protone e una nuova particella, un pione, viene prodotta. Lo scriviamo così:

$$p^+ + p^+ \rightarrow p^+ + \pi^+ + n$$

Ovvero, i protoni collidono e producono un altro protone, un pione positivo (π^+) e un neutrone. Queste particelle sono tutte connesse tra loro dall'interazione forte, e questo è un tipico processo di creazione. Alternativamente, si può vedere questo processo come la dissoluzione di un protone in un «pi greco più» e un neutrone, «sotto l'influenza» di un altro protone.

Un altro genere di creazione, un processo raro ed eccitante chiamato *annichilazione*, ha luogo quando collidono materia e antimateria. Il termine annichilazione è qui usato nel suo senso stretto di «far cessare di esistere qualcosa». Quando un elettrone collide con la sua antiparticella, il positrone, la particella e l'antiparticella scompaiono, e al loro posto compare momentaneamente dell'energia, sotto forma di un fotone. Alle leggi della conservazione questo non piace, cosicché il fotone deve al più presto creare due particelle che prendano il suo posto, per esempio un altro elettrone e un altro positrone. Meno frequentemente, il fotone può dissolversi in un muone e un antimuone, oppure un protone positivo e un antiprotone negativo. L'annichilazione è l'unico fenomeno interamente efficiente nel convertire massa in energia secondo la legge di Einstein $E = mc^2$. Quando esplode una bomba nucleare, per esempio, solo una frazione dell'un per cento della massa atomica viene convertita in energia. Quando la materia e l'antimateria collidono, il cento per cento della massa viene convertita in energia.

Quando stiamo producendo nuove particelle, il requisito primario è che ci sia abbastanza energia, ed $E = mc^2$ è il nostro registro contabile. Abbiamo portato come esempio una collisione fra un elettrone e un positrone che può dare come risultato un protone e un antiprotone, un «pi più» e un «pi meno». Siccome l'energia della massa a riposo di un protone è di circa 1 GeV, le particelle coinvolte nella collisione devono avere almeno 2 GeV per produrre una coppia «pi più» e «pi meno». Più energia aumenta la probabilità di questo risultato e dà agli oggetti appena prodotti un certo ammontare d'energia cinetica che rende più facile la loro osservazione.

Il fascino che avvolge il concetto di antimateria ha dato origine al-

l'ipotesi fantascientifica che essa potrebbe risolvere una volta per tutte il problema energetico. In effetti, un chilogrammo di antimateria fornirebbe energia sufficiente per far funzionare per un giorno gli Stati Uniti. Questo perché l'intera massa di un antiprotone (più il protone che porta con sé annientandosi) è convertita in energia secondo $E = mc^2$. Quando si brucia carbone o petrolio, solamente un miliardesimo della massa si converte in energia. Nei reattori di fissione questa frazione è lo 0,1% e nella tanto attesa fusione nucleare corrisponde (potete fare a meno di trattenere il respiro) allo 0,5% circa.

Particelle dal vuoto

Un altro modo di pensare a queste cose è quello di immaginare che tutto lo spazio, anche lo spazio vuoto, sia pieno di particelle, tutte quelle che la natura, nella sua infinita saggezza, può fornire. Non si tratta di una metafora. Una delle implicazioni della teoria quantistica è che queste particelle appaiono e scompaiono veramente nel vuoto. Le particelle, di ogni dimensione e aspetto, hanno tutte un'esistenza limitata: appaiono e scompaiono in un via vai incessante. Fino a quando ciò accade nel vuoto, si può dire che nulla realmente accade. Questo è parte della fantasmaticità della teoria dei quanti, ma forse può servire per capire quello che succede in una collisione. Qui appare e disappare una coppia di quark «incantati» (un certo tipo di quark con il suo antiquark); là un quark «basso» con il suo compagno antiquark «basso». E laggiù, che cosa sta succedendo, laggiù? Qualsiasi cosa: un X e un anti-X appaiono, un qualcosa di cui, nell'anno del Signore 1993, non sappiamo ancora nulla.

Ci sono delle regole, in questa caotica follia. I numeri quantici devono dare come somma zero, lo zero del vuoto. Un'altra regola vuole che gli oggetti più pesanti appaiano con minor frequenza. Essi «prendono a prestito» energia dal vuoto per far capolino durante la più insignificante frazione di un secondo, poi scompaiono perché devono restituire questa energia in un tempo specificato dal principio di indeterminazione di Heisenberg. Qui sta la chiave: se dall'esterno viene fornita energia, allora l'apparizione virtuale e transeunte di queste particelle originate dal vuoto può essere convertita in esistenza reale, esistenza che può essere rivelata dalle camere a bolle o dai contatori. Fornita come? Ebbene, se una particella ad alta energia, prodotta fresca fresca dall'acceleratore e alla ricerca di nuove particelle, può permettersi di pagare la bolletta – vale a dire, almeno la massa a riposo della coppia di quark o di X – allora lo scompenso energetico lasciato nel vuoto è coperto, e noi diciamo che la nostra particella accelerata ha creato una coppia quark-antiquark. Ovviamente, più pesante è la particella che vogliamo creare, maggiore l'energia che deve fornire la macchina. Nei capitoli VII e VIII incontrerete molte nuove particelle che acquistano esistenza in questa maniera. Detto per inciso, questa fantasia quantistica di un vuoto pervasivo che è pieno di «particelle virtuali» ha delle altre implicazioni controllabili sperimentalmente, come per esempio la modificazione della massa e del magnetismo di elettroni e muoni. Questo verrà spiegato meglio quando parleremo dell'esperimento chiamato «g meno 2».

La grande corsa

La grande corsa per costruire macchine capaci di produrre energie sempre più alte cominciò ai tempi di Rutherford. Durante tutti gli anni Venti essa fu sponsorizzata dalle compagnie dell'energia elettrica, perché quando il voltaggio è alto l'elettricità viene trasportata in maniera più efficiente. Un'altra ragione fu lo sviluppo di raggi X ad alta energia per la cura del cancro. Il radio era già usato per aggredire i tumori, ma era enormemente costoso e si pensava che una radiazione a più alta energia fosse assai vantaggiosa. Perciò le compagnie elettriche e gli istituti di ricerca medica finanziarono lo sviluppo di generatori ad alto voltaggio. Rutherford prese la testa della corsa, nel suo modo caratteristico, quando sfidò la compagnia elettrica inglese Metropolitan-Vickers a «darci un potenziale dell'ordine dei dieci milioni di volt che possa stare in un locale di dimensioni ragionevoli... e un tubo di evacuazione capace di sopportare questo voltaggio».

I fisici tedeschi tentarono di imbrigliare l'enorme voltaggio dei fulmini. Essi appesero un cavo isolato fra due picchi alpini, convogliando cariche di 15 milioni di volt e provocando delle scintille che balenavano per una distanza di cinque metri fra due sfere metalliche: molto spettacolare, ma non molto pratico. Questo approccio al problema fu abbandonato dopo che uno scienziato rimase fulminato mentre stava trafficando con l'apparato.

Il fallimento del gruppo tedesco mise in chiaro che c'era bisogno di qualcosa d'altro oltre alla potenza. I terminali del gap dovevano essere alloggiati in un tubo a fascio elettronico oppure in una camera a vuoto d'aria, che erano dei buoni isolanti. (Agli alti voltaggi piace passare attraverso gli isolanti, a meno che il progetto non sia mol-

to preciso.) Il tubo doveva anche essere abbastanza robusto per sopportare il pompaggio dell'aria al suo estremo. Era necessario un vuoto d'alta qualità, perché se fossero rimaste troppe molecole residue dentro il tubo avrebbero interferito con il fascio. E infine l'alto voltaggio doveva essere abbastanza costante per accelerare una grande quantità di particelle. Questi e altri problemi tecnici dovettero essere risolti fra il 1926 e il 1933.

La competizione era intensa in Europa, e scienziati e istituti di ricerca americani si unirono alla corsa. Un generatore a impulsi costruito a Berlino dalla Allgemeine Elektrizität Gesellschaft raggiunse i 2,4 milioni di volt, ma senza produrre particelle. L'idea venne sfruttata dalla General Electric a Schenectady, che portò l'energia a 6 milioni di volt. Alla Carnegie Institution, a Washington, nel 1928 il fisico Merle Tuve spinse una bobina d'induzione fino a raggiungere svariati milioni di volt, ma non aveva un tubo a fascio elettronico adatto. Charles Lauritsen al Cal Tech riuscì a costruire un tubo a vuoto d'aria che avrebbe sopportato 750.000 volt. Tuve adottò il tubo di Lauritsen e produsse un fascio di 10^{13} (diecimila miliardi) di protoni al secondo a 500.000 volt, abbastanza particelle ed energia per sondare il nucleo, almeno teoricamente. Tuve ottenne infatti delle collisioni nucleari, ma solamente nel 1933, quando due altri concorrenti l'avevano già superato.

Un altro concorrente nelle prime posizioni era Robert Van de Graaff, a Yale e poi al MIT, che costruì una macchina che trasportava la carica elettrica su per una lunghissima cintura di seta che si avvolgeva attorno a una grande sfera di metallo, aumentando gradatamente il voltaggio della sfera fino a che, a pochi milioni di volt, partiva una tremenda scarica verso le pareti dell'edificio. Questo era il famoso generatore di Van de Graaff, familiare a tutti gli studenti americani delle medie superiori. Aumentando il raggio della sfera la scarica veniva ritardata. Immergendo la sfera in gas secco d'azoto si aumentava il voltaggio. Alla fine, i generatori di Van de Graaff divennero le macchine preferite nella categoria sotto i 10 milioni di volt, ma ci vollero anni per perfezionare l'idea.

La corsa continuava, e all'inizio degli anni Trenta fu vinta, anche se per un pelo, da due della banda di Rutherford al Cavendish Lab, John Cockcroft ed Ernest Walton, con l'inestimabile aiuto (devo ammetterlo a malincuore) di un fisico teorico. Cockcroft e Walton, passando per numerosi fallimenti, stavano tentando di ottenere il milione di volt che si riteneva necessario per sondare il nucleo. Un teorico russo, George Gamow, aveva fatto visita a Niels Bohr a Copenaghen

e decise, già che c'era, di fare un salto anche a Cambridge. Lì, conversando con Cockcroft e Walton, disse ai due sperimentali che non avevano bisogno di tutto quel voltaggio. Egli sostenne che la nuova teoria quantistica permetteva di penetrare nel nucleo anche se l'energia non fosse stata sufficiente a soverchiarne la repulsione elettrica. Spiegò che la teoria dei quanti attribuiva ai protoni delle proprietà ondulatorie, che permettevano loro di passare attraverso la «barriera» della carica nucleare, con l'«effetto tunnel» di cui abbiamo parlato nel capitolo V. Cockcroft e Walton alla fine si convinsero e ridisegnarono il loro apparecchio per produrre 500.000 volt. Usando un trasformatore e un circuito moltiplicatore di voltaggio, essi accelerarono i protoni ottenuti da un tubo a scarica del tipo che J.J. Thomson aveva usato per generare i raggi catodici.

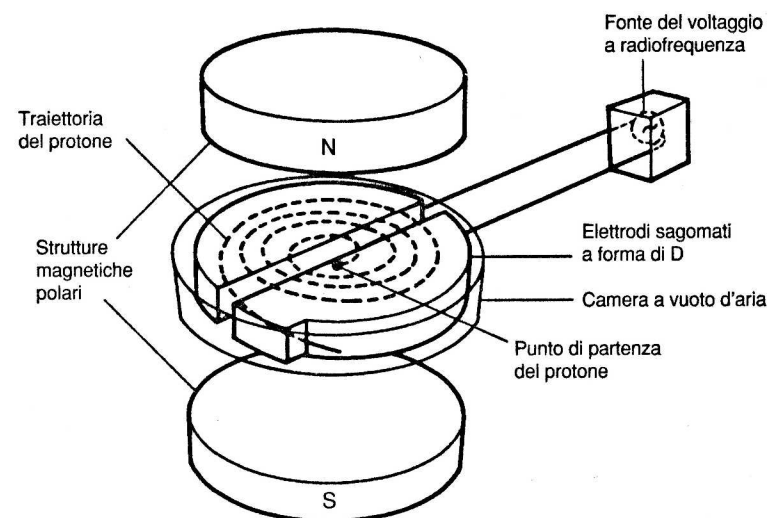
Nella macchina di Cockcroft e Walton una valanga di protoni, circa mille miliardi per secondo, accelerava lungo il tubo di evacuazione e si schiantava contro dei bersagli di piombo, litio e berillio. L'anno era il 1930, e finalmente delle reazioni nucleari erano indotte da particelle accelerate. Il litio era disintegrato da protoni a soli 400.000 eV, molto al di sotto dei milioni di elettronvolt che si erano creduti necessari. Fu un evento storico. Un nuovo tipo di «coltello» era adesso disponibile, sebbene ancora nella sua forma più primitiva.

Il guru californiano

L'azione si sposta ora a Berkeley, California, dove Ernest Orlando Lawrence, originario del Dakota del Sud, era arrivato nel 1928 dopo un brillante inizio di carriera scientifica a Yale. Egli inventò una tecnica radicalmente nuova per accelerare particelle, con una macchina chiamata «ciclotrone», per la quale gli venne assegnato il premio Nobel nel 1939. Lawrence aveva familiarità con le ineleganti macchine elettrostatiche, con i loro imponenti voltaggi e i loro frustranti salti di corrente, e pensava che dovesse esserci un modo migliore. Spulciando nella letteratura scientifica che aveva per argomento i modi per produrre alte energie senza alti voltaggi, capitò sui lavori di un ingegnere norvegese, Rolf Wideröe, il quale aveva notato come si potesse raddoppiare l'energia di una particella, senza bisogno di raddoppiare il voltaggio, facendola passare attraverso due gap in linea. L'idea di Wideröe sta alla base di quelli che sono oggi chiamati acceleratori lineari (linac): un gap è posizionato dopo un altro lungo una linea retta, e le particelle acquistano energia nel passarvi attraverso.

L'articolo di Wideröe suggerì però a Lawrence un'idea ancora migliore. Perché non usare un solo gap con un modesto voltaggio, ma più e più volte? Lawrence fece mente locale sul fatto che, quando una particella carica si muove in un campo magnetico, si muove in circolo. Il raggio è determinato dalla forza del magnete (magnete potente, raggio piccolo) e dal momento della particella carica (momento alto, raggio ampio). Il momento equivale semplicemente alla massa della particella moltiplicata per la sua velocità. Ciò significa che un magnete potente costringerà la particella a muoversi in un piccolo circolo, ma se la particella guadagna energia, e dunque anche momento, il raggio del circolo aumenterà.

Immaginatevi una cappelliera messa fra il polo nord e il polo sud di un grosso magnete. La cappelliera è fatta di ottone o acciaio inossidabile, qualcosa di resistente ma non magnetico. Pompate l'aria fuori dalla cappelliera. Dentro ci sono due strutture di rame a forma di D, cave al loro interno, che occupano quasi interamente la cappelliera: i lati dritti delle D sono aperti e stanno uno di fronte all'altro con un piccolo gap fra loro, mentre invece i lati curvi sono chiusi. Supponete che una delle D abbia carica positiva e l'altra negativa, con una differenza di potenziale, diciamo, di 1000 volt. Una corrente di protoni generata presso il centro del circolo (non importa qui come) attraversa il gap passando dalla D positiva alla D negativa. I protoni guadagnano 1000 volt e il loro raggio adesso cresce, dato che il momento è più alto. I protoni percorrono la D e quando ritornano al gap, grazie a un'astuta inversione, trovano di nuovo un voltaggio negativo. Così vengono di nuovo accelerati e adesso hanno raggiunto quota 2000 eV. Il processo continua. Ogni volta che i protoni attraversano il gap, guadagnano 1000 eV. Come essi acquistano anche momento, lottano contro il potere costrittivo del magnete e il raggio del loro percorso in circolo aumenta. Il risultato è che la spirale descritta dal fascio di protoni si allontana dal centro della cappelliera avvicinandosi man mano alle sue pareti esterne; dove infine essi colpiscono un bersaglio, ha luogo una collisione, e la ricerca ha inizio.

La chiave del ciclotrone sta nell'assicurarsi che i protoni trovino sempre una D negativa dall'altra parte del gap. La polarità deve invertirsi rapidamente da una D all'altra in perfetta sincronia con la rotazione dei protoni. Ma, potete chiedervi, non è difficile sincronizzare l'alternanza di voltaggio con il moto dei protoni, il quale descrive una spirale sempre più ampia man mano che l'accelerazione aumenta? La risposta è no. Lawrence scoprì che l'Onnipotente, nella Sua infinita saggezza, fa in modo che i protoni compensino esattamente la maggior distanza da essi percorsa con la maggior velocità. Essi completano ciascun mezzo giro sempre nello stesso tempo, un processo noto come «accelerazione risonante». Per sincronizzarsi con le orbite dei protoni c'è solo bisogno di un voltaggio che si alterni con una frequenza prefissata, una tecnologia che era allora già usata per le trasmissioni radio. Di qui il nome del meccanismo di accelerazione con inversione: generatore a radiofrequenza. Con questo sistema i protoni arrivano all'orlo del gap esattamente nel momento in cui la D che sta loro di fronte raggiunge il massimo voltaggio negativo.

Lawrence lavorò alla teoria del ciclotrone nel 1929 e nel 1930. Più tardi egli disegnò il progetto di una macchina nella quale i protoni compivano un centinaio di giri acquistando un'energia di 10.000 volt al passaggio del gap. Questa macchina gli avrebbe dato un fascio di protoni a 1 MeV (10.000 volt × 100 giri = 1 MeV). Un tale fascio sarebbe stato «utile per lo studio del nucleo atomico». Il primo prototipo, costruito da Stanley Livingston, uno degli allievi di Lawrence, si fermò abbastanza lontano dall'obiettivo teorico, raggiungendo 80 KeV (80.000 volt). Lawrence allora fece le cose in grande: ottenne un cospicuo finanziamento (ben 1000 dollari!) per costruire una macchina che poteva produrre disintegrazioni nucleari. Le strutture polari (il polo nord e il polo sud del magnete) avevano un diametro di venticinque centimetri, e nel 1932 la macchina accelerò protoni a un'energia di 1,2 MeV. Essi furono usati per produrre collisioni nucleari nel

litio e in altri elementi, solo pochi mesi dopo l'analogo risultato ottenuto dal gruppo di Cockcroft e Walton a Cambridge. Lawrence era arrivato secondo, ma meritava una menzione speciale.

La «big science» e il mito californiano

Lawrence era un organizzatore scientifico di enorme energia e abilità. Egli è stato il padre della «big science». Il termine si riferisce a imponenti stabilimenti scientifici molto complessi e molto costosi nei quali lavorano quantità industriali di scienziati. Nel corso della sua evoluzione, la «big science» ha anche creato nuovi modi di fare ricerca, condotta da interi team di scienziati. Ha inoltre creato problemi squisitamente sociologici, dei quali diremo più oltre. Un tipo simile a Lawrence non si era più visto dai tempi di Tycho Brahe, il signore di Uraniborg, il laboratorio sull'isola di Ven. Lawrence fece degli Stati Uniti un serio concorrente nella corsa ai grandi esperimenti in fisica, e contribuì a creare il mito della California amante di bizzarrie tecnologiche, patria di complesse e costose intraprese. Ma queste erano sfide elettrizzanti per la giovane California e, in verità, per i giovani Stati Uniti.

Nel 1934 Lawrence stava già producendo fasci di deuteroni a 5 MeV con un ciclotrone di quasi un metro. Il deuterone, un nucleo consistente in un protone e un neutrone, era stato scoperto nel 1931 e si era dimostrato essere molto più efficace del protone come proiettile per produrre reazioni nucleari. Nel 1936 lo scienziato otteneva un fascio di deuteroni a 8 MeV. Nel 1939 una macchina di un metro e mezzo operava a energie di 20 MeV. Un mostro iniziato nel 1940 e completato dopo la guerra aveva un magnete che pesava 10.000 tonnellate! I ciclotroni si diffusero in tutto il mondo grazie alla loro capacità di svelare i misteri del nucleo. Essi sono stati anche usati in medicina nella cura dei tumori: il fascio di particelle dirige contro un tumore maligno abbastanza energia per distruggerlo. All'inizio degli anni Novanta più di un migliaio di ciclotroni sono in funzione negli ospedali statunitensi. La ricerca di base in fisica delle particelle ha comunque abbandonato il ciclotrone a favore di un nuovo tipo di macchina.

Il sincrotrone: altro biglietto, altro giro!

La corsa per ottenere energie sempre più alte si intensificò e si estese a tutto il mondo. A ogni nuovo livello d'energia raggiunto, venivano fatte nuove scoperte. Si producevano anche nuovi problemi, e con essi il desiderio di ottenere energie ancora più alte per risolverli. La ricchezza della natura sembrava nascondersi nel microcosmo nucleare e subnucleare.

Il ciclotrone ha dei limiti intrinseci. Poiché la spirale delle particelle cresce verso l'esterno, il numero delle orbite è ovviamente limitato dalla circonferenza dell'apparato. Per ottenere più orbite e più energia ci vuole un ciclotrone più grande. Il campo magnetico deve applicarsi all'intera area della spirale, e dunque il magnete deve essere grande... e costoso. E qui arriva il sincrotrone. Se l'orbita delle particelle, invece di essere a spirale, potesse essere costretta dentro un raggio costante, allora il magnete servirebbe solo lungo questo percorso fisso. Man mano che le particelle acquistassero energia, il campo magnetico potrebbe essere aumentato in maniera sincronizzata in modo tale da tenerle imprigionate nell'orbita di raggio costante. Astuto! Tonnellate e tonnellate di ferro potrebbero essere risparmiate, poiché i pezzi del polo magnetico, trasversali al percorso delle particelle, si misurerebbero adesso in centimetri.

Due importanti dettagli vanno menzionati prima di procedere fino agli anni Novanta. In un ciclotrone le particelle cariche (protoni o deuteroni) compiono migliaia di giri in una camera a vuoto d'aria compresa fra i poli di un magnete. Per impedire alle particelle di disperdersi e urtare contro le pareti della camera, era assolutamente necessario un qualche procedimento di focalizzazione, proprio come quello di una lente che focalizza la luce in un fascio (quasi) parallelo: questo compito era svolto precisamente dal magnete che «pigiava» le particelle in un sottile fascio.

Nel ciclotrone questo avveniva grazie al modo in cui il campo magnetico cambia man mano che i protoni si avvicinano al limite esterno del magnete. Robert R. Wilson, un giovane allievo di Lawrence che diventerà poi il costruttore dell'acceleratore al Fermilab, fu il primo a comprendere l'effetto sottile ma cruciale che le forze magnetiche avevano nel trattenere i protoni. Nei primi sincrotroni, queste forze venivano provviste dalla forma dei poli. In seguito vennero usati degli speciali magneti a quattro poli (con due poli nord e due poli sud) per focalizzare le particelle, mentre degli altri magneti bipolari le tenevano in un'orbita fissa.

Il Tevatron del Fermilab, una macchina da mille miliardi di elettronvolt completata nel 1983, è un buon esempio. Le particelle sono costrette in un'orbita circolare da potenti magneti superconduttori, come delle rotaie che facciano curvare un treno. La condotta del fascio di particelle è un tubo a vuoto d'aria d'acciaio inossidabile (non

magnetico) di forma ovale, largo circa otto centimetri e alto cinque, centrato fra i poli nord e sud dei magneti. Ciascun magnete bipolare è lungo sei metri e mezzo. Quelli quadripolari sono lunghi un metro e mezzo. Per coprire tutta la lunghezza del tubo sono necessari oltre un migliaio di magneti. Tutto l'apparato, tubo più magneti, descrive un circolo che ha un raggio di un chilometro, una bella differenza con il primo modello di dieci centimetri di Lawrence. Potete qui apprezzare i vantaggi del sincrotrone. C'è bisogno, è vero, di un sacco di magneti, ma sono relativamente smilzi, larghi abbastanza per coprire giusto il tubo. Se il Tevatron fosse un ciclotrone, ci vorrebbe un magnete con dei poli di due chilometri di diametro per coprire la macchina che ha una circonferenza di oltre sei chilometri!

Le particelle compiono 50.000 orbite al secondo lungo questo percorso di oltre sei chilometri. In 10 secondi hanno percorso tre milioni e duecentomila chilometri. Ogni volta che passano per un gap – costituito in questo caso da una serie di speciali cavità – un voltaggio a radiofrequenza aumenta l'energia di circa 1 MeV. I magneti che focalizzano le particelle permettono loro di deviare per meno di tre millimetri lungo l'intero percorso. Non è la perfezione, ma ci accontentiamo. Come mirare a una zanzara stando seduti sulla Luna e colpirla nell'occhio sbagliato. Per mantenere i protoni nella stessa orbita mentre vengono accelerati, la forza dei magneti deve aumentare in precisa sincronia con il guadagno d'energia del protone.

Il secondo importante dettaglio ha a che fare con la teoria della relatività: l'aumento di peso dei protoni diventa misurabile quando la loro energia supera i 20 MeV o giù di lì. Questo aumento della massa distrugge la «risonanza ciclotronica» che Lawrence aveva scoperto, e per la quale i protoni che viaggiano in spirale compensavano esattamente la maggior lunghezza del percorso con la maggior velocità. Questo permette che la rotazione sia sincronizzata con una frequenza fissa del voltaggio. A energie più alte il tempo di rotazione aumenta, e non si può più usare un voltaggio a radiofrequenza costante. Per controbilanciare il rallentamento, la frequenza deve decrescere, e così vengono usati dei voltaggi a modulazione di frequenza (FM) per instradare i protoni con massa crescente. Il sincrociclotrone, un ciclotrone a modulazione di frequenza, fu il primo esempio dell'influenza della teoria della relatività nella tecnologia degli acceleratori.

Il protosincrotrone risolve il problema in maniera anche più elegante. È un po' complicato, ma dipende dal fatto che la velocità della particella (99 virgola qualcosa per cento della velocità della luce) è fondamentalmente costante. Supponiamo che la particella attraversi il gap durante quella parte del ciclo della radiofrequenza in cui il voltaggio di accelerazione è zero. Risultato: nessuna accelerazione. Ora aumentiamo di un pochino il campo magnetico. La particella compie un circolo meno ampio e arriva un pochino prima al gap, dove adesso la radiofrequenza è in fase di accelerazione. Perciò la massa cresce, il raggio dell'orbita pure, e ci troviamo di nuovo dove eravamo partiti, ma con più energia. Il sistema è dunque autocorrettivo. Se la particella acquista troppa energia (massa), il suo raggio aumenterà ed essa arriverà più tardi al gap per trovarvi un voltaggio in fase di decelerazione, che correggerà l'errore. Aumentare il campo magnetico ha l'effetto di incrementare l'energia-massa della nostra particella. Questo metodo dipende dalla «stabilità di fase» che verrà discussa più avanti in questo capitolo.

Ike e i pioni

Uno dei primi acceleratori mi è stato particolarmente vicino e caro, il sincrociclotrone da 400 MeV dell'Università della Columbia, costruito in un terreno a Irvington-on-Hudson, nello stato di New York, non molto distante da Manhattan. Il terreno, chiamato Ben Nevis come la montagna della vecchia Scozia, era stato ai tempi delle colonie proprietà di Alexander Hamilton e in seguito appartenne a un ramo della famiglia Du Pont prima di passare all'Università della Columbia. Il ciclotrone Nevis, costruito fra il 1947 e il 1949, fu uno dei più produttivi acceleratori di particelle del mondo durante i circa vent'anni (1950-1972) in cui fu operativo. Produsse anche più di centocinquanta dottorati in fisica, la metà circa dei quali rimase nel campo della fisica delle alte energie trasformandosi in cattedre a Berkeley, Stanford, Cal Tech, Princeton e presso molte altre istituzioni di ricerca di prim'ordine. L'altra metà finì in molti posti: piccole università, istituti di ricerca governativi, amministrazione pubblica, ricerca industriale, banche d'affari...

Io ero uno studente di dottorato quando il presidente (dell'Università della Columbia) Dwight Eisenhower* inaugurò la nuova installazione nel giugno del 1950, durante una semplice cerimonia sul prato dell'incantevole proprietà, circondato da magnifici alberi, arbusti e alcuni tipici edifici a mattoni rossi del New England, e dolce-

* Quattro anni prima della nomina a presidente degli Stati Uniti (1952), Eisenhower rifiutò la candidatura alla guida del paese offertagli dal Partito repubblicano, accettando invece la carica di rettore dell'Università della Columbia. (*NdT*)

mente declinante verso il maestoso fiume Hudson. Dopo un discorsetto adeguato all'occasione, Ike azionò un interruttore e dagli altoparlanti uscì il ticchettio amplificato di un contatore Geiger, che indicava la radiazione di Nevis. In realtà, il ticchettio proveniva da una fonte radioattiva che io tenevo vicino a un contatore, perché Nevis aveva scelto proprio quel momento per guastarsi. Ike non lo venne mai a sapere.

Ma perché 400 MeV? La particella alla moda nel 1950 era il pione, o mesone π, come è anche chiamato. L'esistenza del pione era stata prevista nel 1936 dal fisico giapponese Hideki Yukawa, e si pensava fosse la chiave per arrivare all'interazione forte, che a quei tempi era il grande mistero. Oggi pensiamo a essa in termini di gluoni, ma tornando a quei tempi, bisognava produrre e studiare i pioni, che vanno e vengono dai protoni ai neutroni per tenerli stretti insieme nel nucleo. Per produrre pioni in collisioni nucleari, la particella deve avere un'energia maggiore del prodotto m(pione)c^2, cioè più grande dell'energia della massa a riposo del pione. Moltiplicando la massa a riposo del pione per la velocità della luce al quadrato, si ottiene 140 MeV, la sua energia della massa a riposo. Dal momento che solo una frazione dell'energia di collisione contribuisce alla produzione di nuove particelle, ci occorreva dell'energia extra: decidemmo per 400 MeV, e la macchina Nevis divenne una fabbrica di pioni.

Le signore di Beppo

Prima, però, qualche parola su come scoprimmo i pioni. Alla fine degli anni Quaranta, degli scienziati dell'Università di Bristol, in Inghilterra, avevano notato che quando una particella alfa passa attraverso un'emulsione fotografica stesa su una lastra di vetro, essa «attiva» le molecole che incontra sul suo cammino. Quando si sviluppa la pellicola, si può vedere una traccia di grani di bromuro d'argento. La traccia è facilmente visibile con un microscopio di bassa potenza. Il gruppo di Bristol mandò delle emulsioni molto sottili ai limiti dell'atmosfera, appese a palloni, là dove l'intensità dei raggi cosmici è molto maggiore che al livello del mare. Questa fonte «naturale» di radiazione eccedeva di gran lunga rispetto alle deboli particelle alfa da 5 MeV di Rutherford. E fu proprio in queste emulsioni esposte ai raggi cosmici che il pione fu scoperto nel 1947 dal brasiliano Cesare Lattes, dall'italiano Giuseppe Occhialini e dal professore di Bristol C.F. Powell.

Occhialini, Beppo per gli amici, era il più pittoresco del trio. Speleologo dilettante e gran burlone, Beppo era la forza trainante del gruppo. Egli era l'istruttore di un circolo femminile che studiava diligentemente le emulsioni al microscopio. Il mio relatore per la tesi di dottorato, Gilberto Bernardini, un amico intimo di Beppo, andò un giorno a visitarlo a Bristol. Seguendo le indicazioni che gli erano state date in inglese autoctono, una lingua per lui molto difficile da intendere, Bernardini si era perso rapidamente. Alla fine capitò in un laboratorio dove diverse signore dall'aspetto di vere *ladies* inglesi stavano chine sui microscopi imprecando in un italiano colloquiale che avrebbe scandalizzato dei portuali genovesi. «Ecco!» esclamò Bernardini. «*Dissa is Beppo's lab!*»*

Ciò che le tracce in quelle emulsioni mostravano era una particella, il pione, che entrava a gran velocità, gradualmente rallentava (la densità dei granelli di bromuro d'argento aumenta man mano che la particella rallenta) e infine si fermava. Alla fine della traccia appare una nuova particella carica d'energia che scappa via. Il pione è instabile, ed entro un centesimo di microsecondo decade in un muone (la nuova particella alla fine della traccia) e qualcos'altro. Questo qualcos'altro si scoprì essere un neutrino, che non lasciava tracce nell'emulsione. La reazione si scrive $\pi \rightarrow \mu + \nu$. Cioè un pione (alla fine) dà origine a un muone e a un neutrino. Dal momento che l'emulsione non fornisce informazioni sulla sequenza temporale, occorse un'attenta analisi delle tracce di una mezza dozzina di questi rari eventi per capire che particella era e come decadeva. Bisognava studiare la nuova particella, ma i raggi cosmici forniscono solo un pugno di tali trasformazioni *all'anno*. Come per le disintegrazioni nucleari, ci volevano degli acceleratori con energie abbastanza alte.

A Berkeley, il ciclotrone da quattro metri e mezzo di Lawrence cominciò a produrre pioni, così come la macchina Nevis. Presto i sincrociclotroni di Rochester, Liverpool, Pittsburgh, Chicago, Tokyo, Parigi e Dubna (vicino a Mosca) stavano studiando il pione e le sue interazioni forti con neutroni e protoni così come l'interazione debole nel decadimento radioattivo del pione. Altre macchine a Berkeley, Cornell, Cal Tech e all'Università dell'Illinois usavano elettroni per produrre pioni, ma le macchine più efficaci risultarono essere i sincrociclotroni protonici.

* «Questo è il laboratorio di Beppo», in un inglese molto stentato. (*NdT*)

Il primo fascio esterno: fate il vostro gioco!

Così io ero lì nell'estate del 1950, bisognoso di dati per poter svolgere un dottorato e guadagnarmi da vivere, con una macchina che faceva nascere particelle, pioni. Colpite un pezzo di qualcosa – carbone, rame, *qualsiasi cosa* che contenga nuclei – con i protoni a 400 MeV della macchina Nevis e nasceranno pioni. Berkeley aveva ingaggiato Lattes, il quale mostrava ai fisici locali come esporre e sviluppare quelle emulsioni così sensibili usate con successo a Bristol. Essi mettevano una pila di emulsioni nella camera a vuoto d'aria e facevano colpire dai protoni un bersaglio vicino. Toglievano le emulsioni attraverso una presa a tenuta stagna, le sviluppavano (una settimana di lavoro) e poi le studiavano al microscopio (mesi!). Tutto questo po' po' di lavoro aveva fruttato al gruppo di Berkeley solamente poche dozzine di pioni. Doveva esserci per forza un modo più facile. Il guaio era che i rivelatori di particelle dovevano essere posti dentro la macchina, nella regione del magnete, per poter rivelare i pioni, e il solo mezzo pratico per farlo era mettervi una pila di emulsioni. In effetti, anche Bernardini stava preparando un esperimento con le emulsioni nella macchina Nevis, simile a quello di Berkeley. La grande, elegante camera a nebbia che avevo costruito per la mia tesi di dottorato sarebbe stata un rivelatore molto migliore, ma non entrava fra i poli del magnete dentro un acceleratore. E neppure sarebbe sopravvissuta all'intensa radiazione interna. Fra il magnete del ciclotrone e l'area degli esperimenti stava una parete antiradiazioni di cemento, spessa tre metri.

Era arrivato all'Università della Columbia, proveniente dal rinomato gruppo che studiava i raggi cosmici con Bruno Rossi al MIT, un nuovo borsista, John Tinlot. Era la quintessenza del fisico. A diciannove anni era un violinista che dava concerti, quando decise, dopo molti rovelli, di mettere da parte il violino per studiare fisica. Era il primo giovane specializzando con cui avevo occasione di lavorare, e imparai moltissimo da lui. E non solo fisica. John era un incallito scommettitore e giocatore: cavalli, carte, dadi, roulette, soprattutto tanto poker. Giocavamo durante gli esperimenti mentre si accumulavano i dati. Giocavamo durante le vacanze, sui treni e sugli aerei. Era un modo moderatamente costoso di studiare fisica, dico moderatamente perché non ero il solo a venire spennato, ma dividevo la sorte con studenti, tecnici di laboratorio e personale di vigilanza che John adescava senza pietà.

John e io stavamo seduti sul pavimento del non ancora funzio-

nante acceleratore, scolandoci alcune birre e discutendo del mondo. «Che cosa succede veramente ai pioni che oltrepassano il bersaglio?» chiese improvvisamente. Io avevo imparato a essere cauto. John scommetteva sulla fisica come sui cavalli. «Be', se il bersaglio è dentro la macchina (e dove diamine poteva essere, dato che non sapevamo come ottenere protoni accelerati fuori del ciclotrone), il magnete li sparpaglierà in tutte le direzioni» risposi prudentemente.

John: *Qualcuno* uscirà dalla macchina e colpirà la parete antiradiazioni?
Io: Sicuro, ma un po' dappertutto.
John: Perché non controlliamo?
Io: E come?
John: Con la tracciatura magnetica.
Io: Potrebbe funzionare. (Erano le otto di sera di un venerdì.)
John: Ce l'abbiamo la tavola dei campi magnetici?
Io: Veramente io dovrei andare a casa.
John: Useremo quei grossi rotoli di carta da pacchi per tracciare i percorsi dei pioni su scala uno a uno...
Io: Lunedì?
John: Adesso. Tu fai i calcoli con il regolo (eravamo nel 1950) e io disegnerò i percorsi.

Ebbene, per le quattro del mattino di sabato avevamo fatto una fondamentale scoperta che avrebbe cambiato il modo in cui i ciclotroni venivano usati. Avevamo tracciato un'ottantina di traiettorie di particelle che uscivano da un bersaglio situato nell'acceleratore con delle direzioni e delle energie plausibili (40, 60, 80 e 100 MeV). Con nostro grande stupore, le particelle non andavano «un po' dappertutto». Al contrario, a causa delle proprietà del campo magnetico vicino e oltre il bordo del magnete, esse si raggruppavano in uno stretto fascio che descriveva una curva attorno alla macchina. Avevamo scoperto il fenomeno che divenne conosciuto come «focalizzazione della frangia del campo». Ruotando i grandi fogli di carta, vale a dire scegliendo una particolare posizione per il bersaglio, si poteva fare in modo che il fascio di pioni, con una generosa banda d'energia di circa 60 MeV, si dirigesse dritto dritto sulla mia camera a nebbia nuova di zecca. L'unico problema era la parete di cemento armato fra la macchina e la mia bella camera.

La nostra scoperta era un fulmine a ciel sereno. Il lunedì mattina eravamo accampati davanti all'ufficio del direttore in attesa di dargli la lieta novella. Avevamo tre semplici richieste da fare: (1) un

nuovo posizionamento del bersaglio dentro la macchina; (2) una finestra molto più sottile fra la camera a vuoto del ciclotrone e il mondo esterno, in modo da minimizzare l'influenza della lastra d'acciaio inossidabile da due centimetri e mezzo sui pioni in uscita; e (3) un nuovo foro di circa venticinque centimetri per dieci, questa era la nostra stima, attraverso la parete di cemento spessa tre metri. E tutto questo richiesto da un dottorando nemmeno troppo brillante e da uno appena dottorato!

Il nostro direttore, il professor Eugene Booth, era un gentiluomo della Georgia che aveva studiato anche a Oxford e raramente diceva «Perdincibacco». Quella volta fece un'eccezione per noi. Discutemmo, spiegammo, adulammo. Dipingemmo scenari di gloria! Sarebbe stato famoso! Un fascio esterno di pioni, il primo nella storia!

Booth ci cacciò, ma dopo pranzo ci riconvocò. (Nel frattempo avevamo valutato se era meglio la stricnina oppure l'arsenico.) Quello che era successo era che Bernardini era capitato lì e Booth aveva provato ad accennare la nostra idea a questo eminente professore ospite. Io continuo a credere impossibile che i dettagli di essa, esposti da Booth con il suo accento della Georgia, fossero stati allora veramente capiti da Gilberto, il quale una volta mi confidò: «Booos, Boosth, questi nomi americani sono impronunciabili». Comunque sia andata, Bernardini ci appoggiò con il tipico entusiasmo latino, e svoltammo.

Un mese più tardi era tutto in funzione, proprio come nel nostro modello di carta da pacchi. In pochi giorni la mia camera a nebbia aveva registrato più pioni di tutti gli altri laboratori del mondo messi insieme. Ciascuna fotografia (ne ottenevamo una al minuto) aveva dalle sei alle dieci bellissime tracce di pioni. Ogni tre o quattro fotografie appariva un nodo nella traccia del pione, là dove si disintegrava in un muone e «qualcos'altro». Io feci la mia tesi di dottorato sul decadimento dei pioni. Nel volgere di sei mesi avevamo costruito quattro fasci esterni e Nevis funzionava a pieno regime come fabbrica di dati sulle proprietà dei pioni. Alla prima occasione, John e io andammo all'ippodromo di Saratoga dove, continuando la sua serie fortunata, egli azzeccò un cavallo dato 28 a 1 nell'ottava corsa e sul quale aveva puntato la nostra cena e la benzina per il ritorno. Quel tipo mi andava veramente a genio.

John Tinlot doveva possedere un intuito straordinario per subodorare la focalizzazione della frangia del campo quando nessuno nel business del ciclotrone ne sospettava l'esistenza. Egli fece una brillante carriera come professore all'Università di Rochester, ma morì di cancro a soli quarantatré anni.

Una digressione sociologica: l'origine della «big science»

La seconda guerra mondiale rappresentò un cruciale spartiacque fra la ricerca scientifica di prima e dopo la guerra. (Detto così sembra una verità lapalissiana, no?) E segnò anche l'inizio di una nuova fase nella ricerca dell'a-tomo. Vediamo alcune delle differenze: la guerra significò un grande salto tecnologico, concentrato soprattutto negli Stati Uniti, che non erano disturbati così da vicino dal chiasso delle esplosioni come lo era l'Europa. Gli sviluppi a scopi bellici del radar, dell'elettronica, della bomba nucleare (per usare il suo nome esatto) erano tutti esempi di quello che poteva produrre una collaborazione fra scienza e ingegneria senza vincoli di bilancio.

Vannevar Bush, lo scienziato responsabile della politica della ricerca degli Stati Uniti durante la guerra, delineò questa nuova relazione fra scienza e azione di governo in un eloquente rapporto al presidente Franklin D. Roosevelt, e da quel momento in poi la politica del governo americano fu di finanziare la ricerca scientifica di base. Le sovvenzioni alla ricerca, sia di base sia applicata, crebbero così rapidamente che il finanziamento di 1000 dollari che E.O. Lawrence aveva ottenuto con gran fatica all'inizio degli anni Trenta, dieci anni dopo faceva sorridere. Anche tenendo conto dell'inflazione, quei 1000 dollari scompaiono di fronte ai finanziamenti federali per la ricerca di base nel 1990, qualcosa come 12 miliardi di dollari. La seconda guerra mondiale vide anche una fiumana di scienziati profughi dall'Europa che costituì una delle ragioni del boom della ricerca negli Stati Uniti.

All'inizio degli anni Cinquanta, qualcosa come venti università avevano acceleratori capaci di condurre ricerche in fisica nucleare al massimo livello. E come giungemmo a comprendere meglio il nucleo, la frontiera si spostò nel dominio subnucleare, dove abbisognavano macchine più grandi, e più costose. Si aprì così l'era delle fusioni (scientifiche), delle alleanze e delle acquisizioni. Nove università si consorziarono per costituire e gestire il laboratorio di Brookhaven, a Long Island, dove costruirono una macchina da 3 GeV nel 1952 e una da 30 GeV nel 1960. L'Università di Princeton e quella della Pennsylvania si consorziarono per costruire una macchina protonica vicino a Princeton. Il MIT e Harvard costruirono il Cambridge Electron Accelerator, una macchina da 6 GeV.

Con gli anni, i consorzi divennero sempre più grandi e il numero delle macchine d'avanguardia diminuì. C'era bisogno di energie sempre più alte per porsi la domanda «Che cosa c'è dentro?» e per

cercare i veri a-tomi, gli zero e gli uno della nostra biblioteca metaforica. Come venivano proposte nuove macchine, le più vecchie venivano messe fuori servizio per liberare risorse, e la «big science» (un termine spesso usato come una brutta parola da commentatori ignoranti) divenne sempre più grande. Negli anni Cinquanta si potevano forse fare due o tre esperimenti all'anno con gruppi formati da due a quattro scienziati. Nei decenni successivi, i gruppi divennero sempre più grandi e gli esperimenti richiesero sempre più tempo, in parte per la necessità di costruire rivelatori sempre più complessi. Negli anni Novanta, il solo stabilimento del Collider Detector al Fermilab comprendeva 360 scienziati e studenti provenienti da dodici università, due istituti di ricerca nazionali più altri giapponesi e italiani. La tabella di marcia di un esperimento era lunga un anno intero o più, con interruzioni per Natale, il quattro di luglio, o qualche altra festività che poteva capitare nel mezzo.

A supervisionare l'evoluzione, dalla ricerca fatta attorno a un tavolo a quella fatta con acceleratori di chilometri di circonferenza, c'era il governo federale. Il programma bellico per la bomba fu all'origine della Commissione per l'energia atomica (AEC), un'agenzia civile che sovrintendeva a sviluppo, produzione e immagazzinaggio delle armi nucleari. Ma le venne anche affidato l'incarico di finanziare e sovrintendere alla ricerca di base in fisica nucleare e in quella che divenne poi la fisica delle particelle.

Il caso dell'a-tomo di Democrito entrò anche al Congresso, dove venne creata la Commissione congiunta (camera e senato) per l'energia atomica, con compiti di vigilanza. I verbali della Commissione, pubblicati in grossi volumi di color verde governo, sono una miniera di informazioni per gli storici della scienza. Vi si possono leggere i resoconti delle audizioni di E.O. Lawrence, Robert Wilson, I.I. Rabi, Robert J. Oppenheimer, Hans Bethe, Enrico Fermi, Murray Gell-Mann e molti altri che risposero pazientemente a domande su come stava procedendo la ricerca per la particella finale e sulle motivazioni del bisogno di un'altra macchina. Il dialogo che sta in testa a questo capitolo, fra il brillante fondatore e direttore del Fermilab, Robert Wilson, e il senatore John Pastore, è preso da uno di questi libri verdi.

Per completare la minestrina alfabetica, la AEC si dissolse nella ERDA (*Energy Research and Development Agency*, Ente per la ricerca e lo sviluppo energetico), che presto lasciò il campo al DOE (U.S. Department of Energy), che al presente sovrintende i laboratori nazionali dove operano gli spacca-atomi. Attualmente ce ne sono cinque negli Stati Uniti: SLAC, Brookhaven, Cornell, Fermilab e il Super Collisore Superconduttore, in fase di costruzione.

I laboratori degli acceleratori sono in genere proprietà del governo, ma hanno un contratto di gestione o con un'università, come Stanford nel caso dello SLAC, o con un consorzio di università e altri istituti, come nel caso del Fermilab. Il gerente nomina un direttore, e poi può cominciare a pregare. Il direttore dirige, prende tutte le decisioni importanti e spesso sta troppo tempo in carica. In qualità di direttore del Fermilab dal 1979 al 1989, il mio obiettivo principale è stato quello di mandare avanti il grande progetto di Robert R. Wilson: la costruzione del Tevatron, il primo acceleratore a superconduttività. Dovevamo anche realizzare una macchina per collisioni tra protoni e antiprotoni e rivelatori mostruosi, capaci di osservare collisioni prossime a 2 TeV.

Quando ero direttore del Fermilab, mi preoccupavo molto della ricerca, nel senso che mi preoccupavo di come gli studenti e i giovani ricercatori potessero provare l'eccitazione, la sensazione di imparare in continuazione, il senso di creatività che avevano provato gli studenti di Rutherford, i fondatori della teoria dei quanti, il mio stesso piccolo gruppo di colleghi, quando sgobbavamo sul ciclotrone Nevis. Ma quando guardavo quello che succedeva nel laboratorio, mi sentivo rassicurato. Le notti che visitavo il CDF (quando non ci stava il vecchio Democrito) trovavo studenti molto eccitati per gli esperimenti che stavano facendo. Gli eventi che succedevano nella macchina lampeggiavano su di uno schermo gigante, ricostruiti graficamente al computer per dare un senso di ciò che stava accadendo alla dozzina di fisici di turno. A volte, un evento era così indicativo della «nuova fisica» che si potevano udire emozionati mormorii.

Un gruppo di ricerca è formato da cinque a dieci persone: uno o due professori, diversi ricercatori e svariati dottorandi. Il professore guarda ogni tanto alle sue spalle, per assicurarsi che nessuno si perda tra la folla. All'inizio tutti sono occupati nella progettazione, nella costruzione e nel controllo della strumentazione. Dopo viene l'analisi dei dati. Escono tanti dati da queste collisioni, che molta parte del tempo di un esperimento passa aspettando che qualche gruppo abbia completato la sua analisi. Il singolo giovane scienziato, magari su suggerimento del professore, sceglie un problema specifico che deve ricevere l'approvazione del gruppo ristretto dei leader. I problemi non mancano. Per esempio, quando le particelle W^+ e W^- vengono prodotte in una collisione protone-antiprotone, qual è

la forma precisa in cui ciò avviene? Quanta energia si prendono le particelle W? Con che angolo vengono emesse? E così via. Potrebbe trattarsi solo di un dettaglio interessante, o potrebbe essere un meccanismo cruciale nell'interazione delle forze forti e deboli. L'obiettivo più eccitante per gli anni Novanta è trovare il quark «alto» e misurare le sue proprietà. Questo compito è stato portato avanti fino alla metà del 1992 da quattro sottogruppi del progetto CDF al Fermilab, ognuno di essi eseguendo delle analisi indipendenti.

Qui i giovani fisici sono a casa loro, combattendo contro complessi programmi di computer e le inevitabili distorsioni introdotte da apparecchiature imperfette. Il loro problema è di ricavare una conclusione valida su come funziona la natura, di mettere al suo posto un altro pezzo del puzzle del microcosmo. Essi godono dell'aiuto di un grosso gruppo: esperti di software, di analisi teorica, dell'arte di cercare prove evidenti che confermino delle conclusioni ipotetiche. Se c'è un disturbo elettrico inatteso quando le particelle W escono dalla collisione, sarà prodotto dall'apparato di osservazione (metaforicamente, una piccola incrinatura nella lente del microscopio) o sarà un guaio del software oppure sarà reale? E se è reale, per caso il collega Harry vede un effetto simile anche nelle sue particelle Z, o forse Marjorie nei suoi getti di rimbalzo?

La fisica delle particelle non è la sola provincia della «big science». Gli astronomi condividono telescopi giganti, mettendo insieme le loro osservazioni per trarre conclusioni valide sul cosmo. Gli oceanografi dispongono di navi oceanografiche con equipaggiamenti sofisticati, sonar, batiscafi, cineprese speciali. La ricerca sul genoma è la «big science» dei microbiologi. Perfino i chimici hanno bisogno di grandi spettrometri, potenti computer, costosi apparecchi laser. Disciplina dopo disciplina, è inevitabile che gli scienziati abbiano a disposizione le costose attrezzature che sono necessarie per il progresso della ricerca.

Detto tutto questo, devo aggiungere che è anche estremamente importante per i giovani scienziati essere capaci di lavorare in maniera più tradizionale, raggruppati attorno a un tavolo con i propri compagni e il professore. In questo modo essi hanno la splendida opportunità di azionare un interruttore, spegnere la luce e andare a casa a pensare, e perfino a dormire. Anche la «small science» è stata fonte di scoperte e di innovazioni che hanno contribuito enormemente al progresso della conoscenza. Dobbiamo bilanciare saggiamente la nostra politica scientifica e rendere grazie al cielo che ambedue le opzioni esistano. E per quanto riguarda gli adepti delle alte

energie, liberissimi di storcere il naso e rimpiangere i bei tempi andati, quando lo scienziato solitario sedeva nel suo pittoresco antro, mescolando pozioni nel pentolone. È un'incantevole visione, ma non ci porterà mai alla particella di Dio.

Ritorno alle macchine: tre conquiste tecnologiche

Ci sono stati tre salti in avanti della tecnologia che hanno permesso di costruire acceleratori con energie teoricamente illimitate (illimitate, vale a dire, quando non si considerino i vincoli di bilancio).

Il primo è stato l'elaborazione del concetto di *stabilità di fase*, scoperto indipendentemente e contemporaneamente da un genio sovietico, V.I. Veksler, e da un fisico di Berkeley, Edwin McMillan. L'idea fu anche brevettata, indipendentemente da loro, dall'onnipresente ingegnere norvegese Rolf Wideröe. La stabilità di fase è abbastanza importante da essere spiegata con una metafora. Pensate a due coppe emisferiche identiche con dei piedi molto piccoli. Capovolgete una delle coppe e mettete una pallina sul suo piedino. Mettete una seconda pallina sul fondo della coppa che non è stata capovolta. Le due palline sono ambedue stabili? La risposta è no. La prova si ha dando una spintarella ad ambedue: la prima pallina casca per terra, cambiando radicalmente la sua condizione, ovvero è instabile; la seconda pallina oscilla su e giù all'interno della coppa, attorno alla sua posizione d'equilibrio, ovvero è stabile.

La matematica delle particelle negli acceleratori ha molto in comune con le due palline. Quando un piccolo disturbo – come, per esempio, una leggera collisione della particella con un atomo di gas residuale o con un'altra particella accelerata – produce un grosso cambiamento nel moto, non c'è stabilità e la particella, presto o tardi, si perderà. D'altra parte, se queste perturbazioni producono piccole oscillazioni attorno all'orbita ideale, c'è stabilità.

I progressi nella progettazione degli acceleratori sono stati una squisita miscela di calcoli analitici (adesso eseguiti con l'aiuto del computer) e di invenzioni ingegneristiche, molte delle quali hanno sfruttato la tecnologia del radar, sviluppata durante la seconda guerra mondiale. Il concetto di stabilità di fase venne impiegato in molte macchine applicando forze elettriche a radiofrequenza (RF). Si ha stabilità di fase in un acceleratore quando la radiofrequenza è tale da far arrivare la particella al gap appena fuori tempo, così da produrre un leggero cambiamento nella sua traiettoria; quando arriva al gap la volta successiva, l'errore viene corretto. Ne abbiamo visto

un esempio prima con il sincrotrone. Ciò che succede effettivamente è che l'errore è sovracorretto e la fase della particella, relativa alla radiofrequenza, oscilla attorno a una fase ideale per avere una buona accelerazione, come la pallina dentro la coppa.

Il secondo salto avvenne nel 1952, quando al laboratorio di Brookhaven stavano completando i lavori del Cosmotron, un acceleratore da 3 GeV. Il gruppo di ricerca aspettava la visita di alcuni colleghi del CERN di Ginevra, dove stavano progettando una macchina da 10 GeV. Preparandosi all'incontro, tre ricercatori che appartenevano a una nuova razza di fisici, i teorici degli acceleratori, fecero un'importante scoperta. Stanley Livingston (l'allievo di Lawrence), Ernest Courant e Hartland Snyder si imbatterono in un principio conosciuto come *focalizzazione forte*. Prima di descrivere questa seconda conquista, devo sottolineare come gli acceleratori di particelle fossero diventati argomento di una sofisticata disciplina di ricerca per conto proprio. Rinfreschiamoci le idee in proposito: abbiamo un gap, o una cavità a radiofrequenza, che è ciò che aumenta l'energia delle particelle a ogni passaggio; per farle passare più e più volte, le guidiamo con un magnete in un'orbita approssimativamente circolare. L'energia massima che possono raggiungere le particelle in un acceleratore dipende da due fattori: (1) l'ampiezza del raggio che può coprire il magnete e (2) la forza del campo magnetico dato il raggio. In questo modo possiamo aumentare l'energia o ampliando il raggio o aumentando il campo magnetico, o facendo ambedue le cose.

Una volta fissati questi parametri, dare troppa energia alle particelle le porterebbe fuori dal magnete. I ciclotroni del 1952 non potevano accelerare le particelle a più di 1000 MeV. I sincrotroni fornivano campi magnetici per guidare le particelle entro un raggio prefissato. Ricordate che la potenza del magnete sincrotronico all'inizio è molto bassa (per bilanciare la bassa energia delle particelle all'inizio della loro corsa) e cresce poi gradualmente fino al suo massimo valore. La macchina ha la forma di una ciambella, e il raggio della ciambella a quell'epoca variava dai tre ai quindici metri. Le energie raggiunte arrivavano a 10 GeV.

Il problema che occupava i più brillanti cervelli a Brookhaven era come tenere le particelle strettamente raggruppate e stabili in relazione a un'ideale particella che si muovesse all'interno di campi magnetici matematicamente perfetti senza essere perturbata. Dal momento che i passaggi erano così lunghi, delle minime perturbazioni e imperfezioni del campo magnetico potevano portare le particelle lontano dall'orbita ideale. E dunque niente fascio. E dunque si dovevano creare le condizioni per la stabilità. La matematica era piuttosto complicata, come cercare un ago nel pagliaio.

La focalizzazione forte comporta l'attribuzione ai campi magnetici che guidano le particelle di una forma tale da tenerle molto vicine all'orbita ideale. L'idea chiave è quella di dare alle strutture polari una forma appropriata affinché generino una forza magnetica che faccia oscillare le particelle rapidamente e con delle ampiezze molto limitate attorno all'orbita ideale. Questa è la stabilità. Prima che venisse scoperta la focalizzazione forte, le camere a vuoto d'aria a forma di ciambella dovevano essere larghe da cinquanta centimetri a un metro, e i poli magnetici dovevano essere delle stesse dimensioni. La scoperta di Brookhaven permise una riduzione nelle dimensioni da otto a tredici centimetri. Il risultato? Un enorme risparmio nei costi unitari per MeV dell'energia.

La maggior economicità assicurata dalla focalizzazione forte rese concepibile la costruzione di un sincrotrone con un raggio di sessanta metri. Parleremo più tardi dell'altro parametro, la potenza del campo magnetico. Fino a quando si usi l'acciaio per guidare le particelle, questa potenza è limitata a 2 tesla, il più forte campo magnetico che l'acciaio possa sopportare senza diventare rosso. La focalizzazione forte trovò la sua prima applicazione in una macchina a elettroni da 1 GeV costruita a Cornell da Robert Wilson il Veloce. La richiesta di Brookhaven alla AEC per costruire una macchina protonica a focalizzazione forte si dice fosse una lettera di due pagine. (Ci si potrebbe qui lamentare della crescita delle scartoffie burocratiche in parallelo a quella delle energie, ma non servirebbe a niente.) La richiesta venne approvata, e il risultato fu la macchina da 30 GeV conosciuta come AGS, la cui costruzione fu completata a Brookhaven nel 1960. Il CERN cancellò i suoi piani per una macchina a focalizzazione debole da 10 GeV e fece tesoro dell'idea di Brookhaven per costruire, con gli stessi soldi, un acceleratore a focalizzazione forte da 25 GeV, che entrò in funzione nel 1959.

Per la fine degli anni Sessanta, il modo di ottenere la focalizzazione forte era cambiato: per la guida si usava un «perfetto» magnete bipolare e per la focalizzazione forte si usava un altro magnete quadripolare sistemato simmetricamente attorno al tubo percorso dal fascio di particelle.

Con l'aiuto della matematica, i fisici appresero come campi magnetici complessi dirigano e focalizzino le particelle, così che divennero parte di sofisticati acceleratori magneti con sei, otto, dieci poli. Dagli anni Sessanta in poi i computer sono diventati sempre più importanti per far funzionare e controllare correnti, voltaggi, pressioni e temperature nelle macchine. Insomma, furono i magneti a focaliz-

zazione forte e la capacità di calcolo assicurata dai computer a rendere possibili le notevoli macchine degli anni Sessanta e Settanta.

La prima macchina a varcare la soglia del GeV (un miliardo di elettronvolt) fu il Cosmotron (un nome modesto!) operativo a Brookhaven nel 1952. Poi seguì Cornell con una macchina da 1,2 GeV. E queste sono le altre stelle di quell'epoca...

Acceleratore	*Energia*	*Ubicazione*	*Anno*
Bevatron	6 GeV	Berkeley	1954
AGS	30 GeV	Brookhaven	1960
ZGS	12,5 GeV	Argonne (Chicago)	1964
«200»	200 GeV	Fermilab	1972 (migliorato a 400 GeV nel 1974)
Tevatron	900 GeV	Fermilab	1983

In giro per il mondo c'erano poi Saturne (Francia, 3 GeV), Nimrod (Inghilterra, 10 GeV), Dubna (Unione Sovietica, 10 GeV), KEK PS (Giappone, 13 GeV), PS (CERN/Ginevra, 25 GeV), Serpuhov (ex Unione Sovietica, 70 GeV), SPS (CERN/Ginevra, 400 GeV).

Il terzo balzo tecnologico è rappresentato dall'*accelerazione a cascata*, un concetto la cui elaborazione si deve a Matt Sands, fisico del Cal Tech. Sands decise che, quando si vogliono alte energie, non è efficace adoperare una sola macchina. Egli immaginò diversi acceleratori in sequenza, ciascuno capace di una resa ottimale per un dato intervallo energetico, diciamo da 0 a 1 MeV, da 1 a 100 MeV, e così via. I diversi stadi possono compararsi alle marce di un'auto, ciascuna progettata per aumentare la velocità fino al livello successivo in maniera ottimale. Come l'energia aumenta, il fascio accelerato diventa più stretto. A livelli energetici più alti, la minore ampiezza del fascio richiede magneti più piccoli e meno costosi. L'idea della cascata ha dominato il campo fin dagli anni Sessanta. Le macchine più grandi che la sfruttano sono il Tevatron (con cinque stadi) e il Super Collisore in costruzione nel Texas (sei stadi).

Più grande è più bello?

Una cosa che forse il lettore ha perso di vista in mezzo a tutti questi dettagli tecnologici è perché servano grandi macchine. Wideröe e Lawrence avevano, in fondo, dimostrato che non c'era bisogno di enormi voltaggi per accelerare le particelle ad alte energie, come avevano creduto i pionieri. Bisogna solo far passare le particelle attraverso una serie di gap, oppure far loro percorrere un'orbita circolare, di modo che passino più volte per lo stesso gap. Perciò, nelle macchine circolari non ci sono che due parametri fondamentali: la forza del magnete e il raggio dell'orbita. I progettisti di acceleratori manipolano questi due fattori per ottenere l'energia desiderata. L'ampiezza del raggio è per lo più limitata da questioni di soldi. La forza del magnete dalla tecnologia disponibile. Se non possiamo aumentare il campo magnetico, aumentiamo la circonferenza. Nel Super Collisore vogliamo produrre 20 TeV per ciascun fascio e sappiamo (o almeno crediamo di sapere) quale deve essere la potenza del magnete. Da quella possiamo estrapolare la circonferenza che deve avere il tubo: circa ottantacinque chilometri.

Una quarta conquista: la superconduttività

Torniamo ora indietro al 1911, quando un fisico olandese scoprì che certi metalli, portati a temperature estremamente basse – appena pochi gradi sopra lo zero assoluto della scala Kelvin (– 273 gradi centigradi) –, perdono tutta la loro resistenza al passaggio dell'elettricità. Un filo elettrico a quella temperatura porterebbe corrente in eterno senza far uso di alcuna energia.

A casa vostra, l'energia viene fornita per mezzo di fili di rame dall'azienda elettrica. I fili si riscaldano a causa della resistenza frizionale che offrono alla corrente. Questo calore sprecato usa energia e aumenta la vostra bolletta. Negli elettromagneti convenzionali per motori, generatori e acceleratori, i fili di rame trasportano correnti che generano campi magnetici. In un motore il campo magnetico avvolge fasci di cavi elettrici. In un acceleratore dirige e focalizza le particelle. I cavi di rame del magnete si riscaldano e vengono raffreddati da una potente corrente d'acqua, di solito attraverso dei fori nelle sottili serpentine di rame. Per darvi un'idea della spesa, nel 1975 la bolletta dell'acceleratore del Fermilab era di circa 15 milioni di dollari, il 90% circa dei quali era costituito dal costo dell'energia per i magneti dell'anello principale da 400 GeV.

All'inizio degli anni Sessanta si ebbe un altro balzo in avanti tecnologico. Nuove leghe fatte di metalli esotici resero possibile conservare la fragile condizione di superconduttività trasportando al tempo stesso enormi correnti e producendo forti campi magnetici. E il tutto alle molto più civili temperature da 5 a 10 gradi sopra lo zero assoluto e non a quella, assai più ostica, richiesta dai metalli più comuni, 1 o 2 gradi. L'elio si conserva allo stato liquido a 5 gra-

di sopra lo zero assoluto (a questa temperatura, qualsiasi altra cosa si solidifica), e così emerge la possibilità, non più soltanto teorica, della superconduttività. La maggior parte dei grandi laboratori cominciò a lavorare con fili fatti di leghe di niobio e titanio (NbTi) oppure niobio e stagno (Nb_3Sn) al posto del rame, circondandoli di elio liquido per raffreddarli fino alle temperature che permettono la superconduttività.

Le nuove leghe vennero usate per costruire grandi magneti per i rivelatori di particelle – per circondare, per esempio, una camera a bolle – ma non per gli acceleratori, per i quali c'era bisogno di aumentare il campo magnetico con l'aumento dell'energia delle particelle. Le mutevoli correnti nei magneti generano degli effetti di frizione (dei vortici di corrente) che normalmente distruggono l'effetto superconduttività. Negli anni Sessanta e Settanta molte ricerche si indirizzarono a questo problema, soprattutto al Fermilab diretto da Robert Wilson. Il suo gruppo iniziò a lavorare sui magneti a superconduttività nel 1973, poco dopo l'entrata in esercizio del «200». Una delle motivazioni era la crescita dei costi dovuta alla crisi petrolifera di quegli anni. L'altra era la competizione con la concorrenza rappresentata dal consorzio europeo del CERN.

Gli anni Settanta furono anni di magra per la ricerca negli Stati Uniti. Dopo la seconda guerra mondiale il paese aveva stabilito una solida egemonia nella ricerca scientifica, approfittando anche del fatto che il resto del mondo era occupato a ricostruire le proprie economie e le proprie infrastrutture scientifiche distrutte dalla guerra. Per la fine degli anni Settanta la bilancia aveva cominciato a riequilibrarsi. Gli europei stavano costruendo una macchina da 400 GeV, il Super Protosincrotrone (SPS), e avevano più soldi per equipaggiarla con quei sofisticati e costosi rivelatori di particelle che fanno la differenza. (Questa macchina ha segnato un punto di svolta nei cicli della competizione-collaborazione scientifica internazionale. Negli anni Novanta l'Europa e il Giappone sono davanti agli Stati Uniti in certi campi e non molto indietro in molti altri.)

L'idea di Wilson era che, se si fossero potuti risolvere i problemi legati alle variazioni del campo magnetico, un anello a superconduttività avrebbe risparmiato un'enorme quantità d'energia, producendo al tempo stesso campi magnetici più potenti (il che avrebbe significato più energia per un dato raggio). Con l'aiuto di Alvin Tollestrup, un professore del Cal Tech che passava il suo anno sabbatico al Fermilab (dove alla fine restò), Wilson esplorò come le variazioni di corrente e di campo magnetico creino aumenti di temperatura localizzati. Le ricerche condotte in altri laboratori, specialmente al Rutherford in Inghilterra, furono d'aiuto per creare centinaia di modelli teorici. Anche fisici dei metalli e dei materiali furono della partita e, nel 1977, il gruppo del Fermilab riuscì a trovare la soluzione del problema. Nel modello, si poteva portare la corrente dei magneti da zero a 5000 ampère in 10 secondi, conservando la superconduttività. Nel 1978-79 una linea di produzione cominciò a sfornare magneti di sei metri e mezzo con proprietà eccellenti, e nel 1983 il Tevatron cominciò a funzionare come una «camera di postcombustione» a superconduttività, portando l'energia prodotta da 400 GeV a 900 GeV, mentre il consumo si ridusse da 60 a 20 megawatt, la maggior parte dei quali usati per produrre elio liquido.

Quando Wilson aveva cominciato il suo programma di ricerca nel 1973, la produzione annuale di materiali superconduttori negli Stati Uniti era di pochi quintali. Il consumo di tali materiali fatto al Fermilab, che era di circa sessanta tonnellate, ne stimolò la produzione e cambiò radicalmente l'atteggiamento dell'industria. Oggi i più grossi clienti sono aziende che producono apparecchiature a risonanza magnetica per diagnosi mediche, e il Fermilab può vantare qualche merito per la nascita di questo settore industriale con un fatturato annuo di 500 milioni di dollari.

Il direttore cowboy

L'uomo al quale il Fermilab deve quasi tutto è il nostro primo direttore, artista, progettista, cowboy, Robert Rathbun Wilson, personaggio carismatico se mai ve ne sono stati. Wilson era cresciuto nel Wyoming, dove andava a cavallo e studiava duro a scuola, vincendo una borsa di studio per Berkeley. Qui egli studiò con E.O. Lawrence.

Ho già avuto modo di descrivere le gesta architettoniche di questo novello uomo del Rinascimento nel costruire il Fermilab, ma egli era anche personaggio di grandi vedute tecnologiche. Quando fu nominato direttore dell'allora nascente Fermilab nel 1967, ricevette un finanziamento di 250 milioni di dollari per costruire (così dicevano le direttive) una macchina da 200 GeV con sette linee di fasci di particelle. Il tempo previsto per l'esecuzione dell'opera, cominciata nel 1968, era di cinque anni, ma Wilson la finì in anticipo, nel 1972. Nel 1974 stava funzionando a regime di 400 GeV con quattordici linee e con un risparmio di 10 milioni sulla spesa prevista, e dentro il più bell'edificio del governo degli Stati Uniti. Ho calcolato recentemente che, se Wilson fosse stato responsabile del bilancio della difesa per gli ultimi quindici anni con la stessa abilità, gli Stati Uniti go-

drebbero oggi di un considerevole avanzo di bilancio e i nostri carri armati sarebbero ammirati alle esposizioni di disegno industriale.

Una leggenda vuole che l'idea del Fermilab sia sorta nella mente di Wilson nei primi anni Sessanta, mentre era professore a Parigi nell'ambito di un piano di scambi culturali. Pare che un giorno si trovasse con un gruppo di artisti a una lezione di nudo alla Grande Chaumière. Negli Stati Uniti si stava allora discutendo il «200» e a Wilson non piaceva come stava andando la faccenda. Così, mentre gli altri disegnavano seni, lui disegnava tubi per fasci di particelle, decorandoli con calcoli. Questo è essere attaccati al proprio lavoro.

Nemmeno Wilson era perfetto. Egli prese delle scorciatoie mentre costruiva il Fermilab e non tutte riuscirono a buon fine. Dovette rimpiangere amaramente un errore che gli costò un anno di ritardo nei lavori (altrimenti avrebbe finito nel 1971) e 10 milioni di dollari. Perse la pazienza per i finanziamenti federali elargiti con il contagocce alla sua ricerca sulla superconduttività, e nel 1978 lasciò. Quando mi chiesero di succedergli nella carica di direttore, andai a trovarlo. Mi minacciò di non darmi pace se non avessi accettato l'incarico, e cominciò a farlo. La prospettiva di essere perseguitato da Wilson a cavallo era troppo per me. Così accettai e preparai tre buste.

Un giorno nella vita di un protone

Tutto quello che è stato spiegato in questo capitolo può essere esemplificato dall'acceleratore a cascata del Fermilab, con le sue cinque macchine in sequenza (sette se mettete in conto anche i due anelli dove produciamo antimateria). Il Fermilab è una complessa coreografia costituita da cinque diversi acceleratori, ciascuno dei quali rappresenta un gradino nella scala dell'energia e della sofisticazione tecnologica, come l'ontogenesi che riassume la filogenesi (o qualsiasi altra cosa riassuma).

Innanzitutto dobbiamo avere qualcosa da accelerare. Andiamo ai grandi magazzini e compriamo una bottiglia pressurizzata di gas di idrogeno. L'atomo di idrogeno consiste di un elettrone e di un semplice nucleo composto di un solo protone. In questa bottiglia ci sono abbastanza protoni per far funzionare il Fermilab per un anno. Costo: circa venti dollari senza cauzione per la bottiglia. La prima macchina nella cascata non è altro che un acceleratore elettrostatico di Cockcroft e Walton, modello 1930. Sebbene sia il più vecchio di tutti gli acceleratori del Fermilab, è il più futuribile nell'aspetto, adorno com'è di grosse e luccicanti sfere e di anelli a forma di ciambella che

sono la delizia dei fotografi in visita. Nell'acceleratore Cockcroft e Walton una scintilla libera l'elettrone dall'atomo, lasciando un protone carico positivamente e sostanzialmente in quiete. La macchina accelera poi i protoni, creando un fascio a 750 KeV diretto verso l'ingresso della macchina successiva, che è un acceleratore lineare, o linac. Il linac manda i protoni attraverso una serie di cavità a radiofrequenze (gap), lunga centocinquanta metri, che li accelera a 200 MeV.

A questa rispettabile energia essi vengono trasferiti per mezzo della guida magnetica al booster, un sincrotrone che li agita per bene e porta la loro energia a 8 GeV. Pensate: a questo punto abbiamo prodotto energie maggiori di quelle del Bevatron di Berkeley, il primo acceleratore a superare la soglia del GeV, e ci restano ancora due anelli. Questo carico di protoni viene ora immesso nell'anello principale, la macchina «200», quella di sei chilometri di circonferenza che negli anni 1974-1982 lavorava a 400 GeV, due volte l'energia per la quale era stata inizialmente progettata. L'anello principale era il cavallo da tiro del Fermilab.

Dopo l'entrata in servizio del Tevatron nel 1983, l'anello principale ha potuto cominciare a prendersela più comoda. Adesso porta i protoni solamente a 150 GeV e poi li manda all'anello a superconduttività del Tevatron, che ha esattamente la stessa circonferenza dell'anello principale e sta qualche metro sotto il primo. Nella procedura normale di utilizzo del Tevatron, i magneti a superconduttività fanno girare le particelle a 150 GeV, 50.000 giri al secondo, guadagnando circa 700 KeV al giro, fino a che, dopo circa 25 secondi, hanno raggiunto 900 GeV. A quel punto i magneti, dotati di corrente a 5000 ampère, hanno aumentato la forza del loro campo fino a 4,1 tesla, più del doppio di quanto potevano dare i vecchi magneti di ferro. E l'energia richiesta per mantenere i 5000 ampère è praticamente zero! La tecnologia delle leghe a superconduttività è in continuo sviluppo. Per il 1990 la tecnologia del Tevatron è stata sviluppata al punto che il Super Collisore userà dei campi magnetici di 6,5 tesla, e il CERN sta lavorando duramente per spingere la tecnologia a quello che potrebbe rappresentare il limite per le leghe di niobio, 10 tesla. Nel 1987 si è scoperto un nuovo tipo di superconduttore, a base di materiali in ceramica che richiedono solo azoto liquido per il raffreddamento. Si sono create speranze che un nuovo abbattimento dei costi sia possibile, ma non sappiamo come produrre i forti campi magnetici necessari, e nessuno può oggi prevedere se e quando questi nuovi materiali sostituiranno il titanio-niobio.

Per il Tevatron, 4,1 tesla è il limite, e a questo punto i protoni ven-

gono spediti dalle forze elettromagnetiche in un'orbita che li porta fuori dalle macchine, dentro un tunnel dove vengono suddivisi in quattordici fasci distinti. Qui i gruppi di ricerca mettono i bersagli e i rivelatori che servono ai loro esperimenti. Qualche migliaio di fisici lavora al programma con bersaglio fisso. La macchina opera in cicli. Ci vogliono circa 30 secondi per l'accelerazione. Il fascio viene emesso a intervalli di 20 secondi per non sovraffollare i rivelatori. Questo ciclo viene ripetuto ogni minuto.

Il fascio esterno è focalizzato in maniera estremamente precisa. I miei colleghi ed io abbiamo messo in piedi un esperimento sul «centro protonico» in cui un fascio di protoni viene estratto, focalizzato e condotto per circa due chilometri e mezzo verso un bersaglio largo due decimillimetri, lo spessore di una lama di rasoio. I protoni collidono con il filo della lama. Ogni minuto, giorno dopo giorno, per settimane, un fascio di protoni colpisce questo bersaglio, senza mai deviare per più di una minuscola frazione di questa misura.

L'altro modo di usare il Tevatron, cioè per provocare collisioni, è piuttosto diverso, e lo vedremo in dettaglio. In questo caso i protoni girano in tondo a 150 GeV aspettando gli antiprotoni, che a tempo debito sono liberati dalla loro fonte pi meno e immessi nell'anello in direzione opposta a quella dei protoni. Quando ambedue i fasci sono nel Tevatron, cominciamo a smanettare sui magneti per accelerarli. (Più particolari fra un momento.)

In ogni fase della sequenza, dei computer controllano i magneti e i sistemi delle radiofrequenze, tenendo i protoni strettamente raggruppati e sotto controllo. Dei sensori provvedono tutta l'informazione su correnti, voltaggi, pressioni, temperature, localizzazione dei protoni, nonché sull'indice Dow Jones. Qualche disfunzione potrebbe deviare il fascio fuori dal tubo a vuoto d'aria, attraverso la struttura dei magneti che lo avvolgono, producendo un buco molto ben fatto e molto costoso. Questo non è mai successo, almeno fino a oggi.

Scelte, scelte: protoni contro elettroni

Finora abbiamo parlato a lungo delle macchine protoniche, ma i protoni non sono una scelta obbligata. La cosa carina dei protoni è che accelerarli è relativamente poco costoso. Possiamo accelerarli a migliaia di miliardi di elettronvolt. Il Super Collisore accelererà protoni a ventimila miliardi di elettronvolt. In effetti, può darsi che non vi siano limiti teorici a quello che possiamo fare con essi. D'altra parte, i protoni sono pieni di altre particelle, quark e gluoni. Ciò rende

le collisioni confuse e complicate. Ecco perché alcuni fisici preferiscono accelerare elettroni, che sono strutture semplici, a-tomiche. Poiché sono punti, le loro collisioni risultano più pulite di quelle dei protoni. L'altra faccia della medaglia è che la loro massa è piccola, di modo che risulta difficile e costoso accelerarli. La loro piccola massa dà luogo a una grande radiazione elettromagnetica quando vengono scagliati nelle orbite circolari. Di conseguenza, una maggior potenza deve entrare in gioco per compensare la perdita di radiazione. Mentre questa radiazione è uno spreco dal punto di vista dell'accelerazione, è una pacchia per certi ricercatori, perché è molto intensa e ha una lunghezza d'onda minima. Molti acceleratori circolari di elettroni sono attualmente impiegati per produrre proprio questa radiazione sincrotronica. La clientela interessata include biologi che usano l'intenso fascio di fotoni per studiare la struttura di grosse molecole, produttori di chip elettronici che fanno litografia ai raggi X, scienziati della materia che studiano la struttura dei vari materiali e molti altri tipi di studiosi delle scienze applicate.

Un modo di evitare questa perdita d'energia è quello di usare acceleratori lineari, come il linac di Stanford, lungo più di tre chilometri e costruito nei primi anni Sessanta. La macchina di Stanford venne chiamata in origine «M», come mostro, ed era una macchina sensazionale per i suoi tempi. Partiva dal campus di Stanford, a circa quattrocento metri dalla faglia di San Andreas, e finiva sotto la baia di San Francisco. Lo Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) deve la sua esistenza all'attivismo e all'intraprendenza del suo fondatore e primo direttore, Wolfgang Panofsky. Robert J. Oppenheimer raccontava la storia del brillante Panofsky e del suo altrettanto brillante fratello gemello, Hans, ambedue studenti a Princeton, ambedue con un curriculum di studi sfolgorante, ma uno un pelo meglio dell'altro. Da quel momento, diceva Oppenheimer, essi divennero lo «sveglio» Panofsky e il «tonto» Panofsky. Quale dei due? «Mistero!» dice Wolfgang, chiamato da molti di noi Pieffe.

Le differenze tra il Fermilab e lo SLAC sono ovvie: uno fabbrica protoni, l'altro elettroni; uno è circolare, l'altro dritto. E quando diciamo che un acceleratore lineare è dritto, intendiamo proprio dritto. Per esempio, supponiamo di costruire un tratto di tre chilometri di strada rettilinea. Il sovrintendente ai lavori ci garantisce che è rettilinea, ma non lo è. Essa segue la curvatura terrestre, per quanto impercettibile. Per chi sta sulla superficie del pianeta è dritta, ma per chi guarda dallo spazio forma un arco. Il tubo dello SLAC, invece, è *dritto*. Se la Terra fosse una sfera perfetta, il linac sarebbe una tan-

gente alla superficie del pianeta lunga più di tre chilometri. Le macchine elettroniche hanno proliferato in giro per il mondo, ma quella dello SLAC è rimasta la più spettacolare, accelerando elettroni a 20 GeV nel 1960 e a 50 GeV nel 1989, fino a che gli europei non hanno preso la testa.

Ci sono collisioni e collisioni

Queste sono le nostre scelte, per adesso. Si possono accelerare protoni oppure elettroni, in circolo o in linea retta. Ma c'è un'altra decisione ancora da prendere.

Normalmente, si estraggono dei fasci di particelle dalla prigione magnetica dove sono confinati e si trasportano, sempre dentro tubi a vuoto d'aria, fino a un bersaglio dove hanno luogo le collisioni. Abbiamo spiegato come l'analisi delle collisioni fornisca informazione sul mondo subnucleare. Le particelle accelerate portano con sé una certa quantità d'energia, ma solo una frazione di essa è disponibile per esplorare la natura a breve distanza o per produrre nuove particelle secondo l'equazione $E = mc^2$. La legge della conservazione del momento dice che parte dell'energia immessa verrà conservata e trasmessa ai prodotti finali delle collisioni. Per esempio, se un autobus urta un autocarro fermo, molta dell'energia dell'autobus accelerato verrà impiegata nello scagliare lontano pezzi di metallo, di cristallo e di gomma e deve essere sottratta dal totale dell'energia che poteva essere impiegata nel demolire l'autocarro più accuratamente.

Se un protone a 1000 GeV urta un protone a riposo, le leggi della natura vogliono che, qualunque particella ne provenga, essa debba avere abbastanza moto in avanti da uguagliare il momento del protone incidente. Quello che succede è che, a causa di ciò, resta solamente un massimo di 42 GeV per creare nuove particelle.

A metà degli anni Sessanta ci rendemmo conto che se si fosse potuto fare in modo che due particelle, ciascuna con tutta l'energia del fascio accelerato, si scontrassero frontalmente, si sarebbe ottenuta una collisione straordinariamente più violenta. Sarebbe stato coinvolto il doppio dell'energia dell'acceleratore, ed essa sarebbe stata *tutta* disponibile, poiché il momento iniziale totale è zero (momenti uguali e contrari per gli oggetti che collidono). Ergo, in un acceleratore da 1000 GeV, una collisione frontale di due particelle, ciascuna con 1000 GeV, rilascia 2000 GeV per la creazione di nuove particelle, contro i 42 GeV di un acceleratore usato con bersagli fissi. C'è un però: una mitragliatrice può colpire facilmente un bersaglio fisso; più difficile è che i proiettili di due mitragliatrici che sparino l'una contro l'altra si scontrino in volo. Questo per rendere l'idea delle difficoltà coinvolte nel funzionamento di un acceleratore che faccia urtare fra loro i fasci di particelle.

Produttori di antimateria

Allo SLAC fece seguito, a Stanford nel 1973, un acceleratore molto produttivo chiamato SPEAR, che sta per Stanford Positron-Electron Accelerator Ring: fasci di elettroni vengono qui accelerati a un'energia compresa fra 1 e 2 GeV, nell'acceleratore lineare lungo tre chilometri, e poi immagazzinati in un piccolo anello magnetico. I positroni, le particelle di Carl Anderson, sono il prodotto di una sequenza di reazioni: un intenso fascio di elettroni colpisce un bersaglio per produrre, fra le altre cose, un intenso fascio di fotoni. I detriti, composti da particelle cariche, vengono spazzati via da magneti che non esercitano alcun effetto sui fotoni, che sono invece neutri. Dopo, un fascio pulito di fotoni colpisce un sottile bersaglio, per esempio platino. Il risultato più frequente è che l'energia pura del fotone si converta in un elettrone e in un positrone, che condividono l'originale energia del fotone, meno la massa a riposo dell'elettrone e del positrone.

Un magnete raccoglie una parte dei positroni e questi vengono immessi in un anello di immagazzinaggio dove degli elettroni sono stati in paziente attesa, girando in tondo. Le correnti di positroni e di elettroni hanno cariche opposte, e perciò girano in direzioni opposte in un campo magnetico. Se una corrente gira in senso orario, l'altra gira in senso antiorario. Il risultato è ovvio: uno scontro frontale. Lo SPEAR permise delle importanti scoperte, così che le macchine per collisioni divennero molto popolari, come i loro (poetici?) acronimi. Prima di SPEAR ci fu ADONE (Italia, 2 GeV); dopo SPEAR (3 GeV), vennero DORIS (Germania, 6 GeV), poi PEP (ancora Stanford, 30 GeV), PETRA (Germania, 30 GeV), CESR (Cornell, 8 GeV), VEPP (ex Unione Sovietica), TRISTAN (Giappone, da 60 a 70 GeV), LEP (CERN, 100 GeV) e SLC (Stanford, 100 GeV). Si noti che le macchine per collisioni sono ordinate secondo la somma dei due fasci energetici: il LEP, per esempio, ha 50 GeV in ciascun fascio, pertanto è una macchina da 100 GeV.

Collisioni frontali fra protoni si ottennero nel 1972 nel pionieristico stabilimento del CERN a Ginevra chiamato ISR (Intersecting Storage Ring): due anelli indipendenti si intrecciavano l'uno con l'altro, producendo, in otto punti di intersezione, delle collisioni fra protoni che circolavano in direzioni opposte. Materia (elettroni) e antimateria

(positroni) possono coesistere nel medesimo anello perché i magneti fanno circolare le particelle in direzioni opposte, mentre per scagliare i protoni gli uni contro gli altri occorrono due anelli separati.

Nell'ISR ciascun anello veniva riempito con protoni a 30 GeV provenienti dall'acceleratore convenzionale del CERN, il PS. In ultima analisi, l'ISR ebbe molto successo, ma alla sua entrata in funzione, nel 1972, ottenne solo poche migliaia di collisioni al secondo nei punti di collisione «ad alta luminosità». «Luminosità» è il termine usato per indicare il numero di collisioni al secondo, e le difficoltà iniziali dell'ISR dimostravano quanto difficile fosse far scontrare i proiettili di due mitragliatrici (i due fasci). Alla fine la macchina arrivò a ottenere 5 milioni di collisioni al secondo. Per ciò che riguarda la ricerca vera e propria, l'ISR permise delle importanti misurazioni, ma fu soprattutto un valido banco di prova per la tecnologia delle macchine per collisioni e dei rivelatori. Era una macchina molto elegante, sia tecnicamente sia esteticamente, un prodotto degno degli orologiai svizzeri. Vi lavorai nel 1972, durante un anno sabbatico, e vi ritornai poi più volte nel decennio successivo. Una volta vi portai in visita I.I. Rabi, che era a Ginevra per un convegno sul tema «Atomi per la pace». Quando entrammo nell'elegante tunnel dell'acceleratore, Rabi spalancò la bocca ed esclamò: «Ah, Patek Philippe!».

La macchina più difficile, in grado di sparare protoni contro antiprotoni, fu resa possibile dall'invenzione di un russo geniale, Gershon Budker, il quale lavorava nella Città della scienza sovietica di Novosibirsk. Budker era impegnato nella costruzione di macchine elettroniche in Russia, in competizione con il suo amico americano Wolfgang Panofsky. Poi venne trasferito a Novosibirsk, un complesso di ricerca nuovo di zecca in Siberia. Dato che Panofsky non era stato trasferito in Alaska, la competizione non era più equa, così egli disse, e per questo si vide costretto a inventare qualcosa di nuovo.

Negli anni Cinquanta e Sessanta a Novosibirsk Budker diresse un fiorente sistema capitalistico di vendita di piccoli acceleratori all'industria sovietica in cambio di materiali e denaro per finanziare le proprie ricerche. Egli era affascinato dalla prospettiva di usare antiprotoni, o pi meno, come proiettili, ma si rendeva conto di come fossero una merce rara. L'unico posto dove si trovino è in collisioni ad alta energia, dove vengono prodotti secondo la solita formula $E = mc^2$. Una macchina con molte decine di GeV produrrà solo pochi pi meno fra i detriti delle collisioni. Per accumularne a sufficienza perché siano utili bisogna aspettare molte ore. Ma come i pi meno emergono da un bersaglio colpito, si muovono in tutte le direzioni. Agli scienziati degli acceleratori piace descrivere questi moti nei termini della direzione principale e dell'energia e dei moti superflui e di contorno che tendono a coprire tutto lo spazio disponibile nella camera a vuoto d'aria. Budker vide la possibilità di «raffreddare» le componenti di contorno dei loro moti e di comprimere e conservare i pi meno in un fascio molto più denso. Ma questo è un affare complicato, che coinvolge più alti livelli di controllo del fascio, di stabilità magnetica, di perfezione nella produzione del vuoto d'aria. Gli antiprotoni devono essere immagazzinati, raffreddati e tenuti in fresco per oltre dieci ore prima che ce ne siano abbastanza da usare per una collisione: era una magnifica idea, ma troppo complessa per le limitate risorse che Budker aveva in Siberia.

E qui entra in scena Simon Van der Meer, un ingegnere olandese del CERN che ha fatto progredire questa tecnica del raffreddamento alla fine degli anni Settanta e ha contribuito a costruire la prima fonte di pi meno da usare con la prima macchina per collisioni tra protoni e antiprotoni. Egli impiegò l'anello da 400 GeV del CERN sia come mezzo di immagazzinaggio sia per produrre le collisioni, e le prime collisioni tra pi e pi meno furono ottenute nel 1981. Van der Meer ha condiviso il premio Nobel nel 1984 con Carlo Rubbia per il contributo dato dalla sua tecnica di «raffreddamento stocastico» al programma di ricerca preparato dall'italiano, che ha portato alla scoperta delle particelle W^+, W^- e Z^0, delle quali parleremo in seguito.

Carlo Rubbia è un personaggio così pittoresco che meriterebbe un libro intero solo per lui, e in effetti almeno uno ce l'ha (*Nobel Dreams*, di Gary Taubes). Uno fra i più brillanti laureati della prestigiosa Scuola Normale Superiore di Pisa, dove studiò anche Enrico Fermi, Carlo è un motorino in perenne movimento: ha lavorato al Nevis, al CERN, a Harvard, al Fermilab, di nuovo al CERN e poi ancora al Fermilab. Viaggiando tanto, ha inventato un complesso schema di minimizzazione dei costi interscambiando le metà di andata e quelle di ritorno dei suoi biglietti aerei. Una volta lo convinsi che sarebbe dovuto andare in pensione con ancora otto biglietti, tutti in direzione ovest-est. Nel 1989 è diventato direttore del CERN, quando il laboratorio del consorzio europeo teneva da sei anni la leadership nel campo delle collisioni tra protoni e antiprotoni. La testa è stata però ripresa nel 1987-88 dal Tevatron, quando il Fermilab ha fatto dei significativi passi avanti rispetto allo schema del CERN e ha reso operativa la sua fonte di antiprotoni.

I pi meno non crescono sugli alberi, e nemmeno si possono comprare ai grandi magazzini. Il Fermilab è oggi il più grande produttore di anti-

protoni al mondo, antiprotoni immagazzinati in un anello magnetico. Un futuristico studio della U.S. Air Force e della Rand Corporation ha stabilito che un milligrammo (sì, proprio un millesimo di grammo) di antiprotoni sarebbe un propellente per razzi ideale, pari all'energia prodotta da circa due tonnellate di benzina. Dal momento che il Fermilab produce 10^{10} antiprotoni all'ora, quanto tempo si impiegherebbe per fabbricarne un milligrammo? Al ritmo attuale, pochi milioni di anni, lavorando ventiquattr'ore su ventiquattro. Prevedendo con straordinario ottimismo qualche innovazione tecnologica, si potrebbe ottenere una riduzione a poche migliaia di anni. Perciò il mio consiglio è di non comprare azioni di produttori di antiprotoni, almeno per ora.

Il metodo del Fermilab è il seguente. Il vecchio acceleratore da 400 GeV (l'anello principale) operando al livello di 120 GeV scaglia protoni contro un bersaglio ogni due secondi. Ogni collisione di circa 10^{12} protoni produce, più o meno, dieci milioni di antiprotoni che vanno nella giusta direzione con la giusta energia. Con ognuno dei pi meno viaggiano migliaia di indesiderati pioni, kaoni e altri detriti, ma sono tutti instabili e prima o poi scompaiono. I pi meno vengono focalizzati in un anello magnetico chiamato anello distributore, dove vengono trattati, organizzati e compressi, e quindi trasferiti nell'anello di accumulazione. Ambedue gli anelli sono lunghi circa cinquanta metri e immagazzinano pi meno a 8 GeV, la stessa energia del booster. Ci vogliono da cinque a dieci ore per accumulare abbastanza pi meno da rimandare indietro all'acceleratore. L'immagazzinaggio è un affare delicato, dal momento che tutte le nostre apparecchiature sono fatte di materia (e di che cos'altro, se no?) e i pi meno sono antimateria: se vengono in contatto con la materia, va tutto in fumo. Così dobbiamo essere particolarmente meticolosi nel tenerli al centro del tubo a vuoto d'aria. E la qualità del vuoto deve essere straordinaria, il miglior «nulla» sul mercato.

Dopo averli accumulati e tenuti compressi per circa dieci ore, i pi meno sono pronti per essere reimmessi nell'acceleratore. Con una procedura degna di un lancio della NASA, durante un teso conto alla rovescia ci si assicura che ogni voltaggio, ogni corrente, ogni circuito, ogni magnete e ogni interruttore siano a posto. Allora i pi meno sono lanciati nell'anello principale, dove circolano in senso antiorario a causa della loro carica negativa. Essi vengono accelerati a 150 GeV e trasferiti, sempre con guida magnetica, all'anello superconduttore del Tevatron. Qui stavano aspettando pazientemente i protoni, immessi dal booster attraverso l'anello principale, circolando instancabilmente in direzione oraria. Adesso abbiamo due fasci, che corrono in direzioni opposte

negli oltre sei chilometri dell'anello. Ciascun fascio è composto da sei gruppi di particelle, con circa 10^{12} protoni e un numero appena minore di antiprotoni per gruppo.

Ambedue i fasci sono accelerati da 150 GeV, l'energia ricevuta dall'anello principale, ai 900 GeV del Tevatron a pieno regime. Il passo finale è la «compressione». Poiché i fasci circolano in direzioni opposte dentro lo stesso piccolo tubo, è inevitabile che si incrocino durante la fase di accelerazione. La loro densità è però così bassa che le collisioni sono molto poche. La «compressione» è eseguita da speciali magneti superconduttori quadripolari che comprimono i diametri dei fasci dalle dimensioni di una cannuccia per bibita (pochi millimetri) a quelle di un capello (micron). Ciò accresce enormemente la densità delle particelle. Adesso, quando i fasci si incontrano, c'è almeno una collisione a ogni incrocio. I magneti devono assicurare che le collisioni avvengano proprio al centro dei rivelatori. Il resto è affar loro.

Una volta eseguite tutte queste operazioni, si accendono i rivelatori e si comincia a raccogliere i dati. In genere si continua dalle dieci alle venti ore, mentre altri pi meno vengono accumulati con l'aiuto del buon vecchio anello principale. Con il passar del tempo, i gruppi di protoni e antiprotoni si diradano e si ha una diminuzione nella frequenza delle collisioni. Quando la luminosità (il numero di collisioni per secondo) è scesa a circa il 30%, e se ci sono abbastanza pi meno nuovi nell'anello di accumulazione, allora viene fatta piazza pulita e ricomincia un nuovo conto alla rovescia in stile NASA. Ci vuole circa mezz'ora per riempire di nuovo il Tevatron. Duecento miliardi circa di antiprotoni è considerato un buon numero. Se sono di più, è meglio. Essi si scontrano con cinquecento miliardi di protoni, molto più facili da ottenere, per produrre circa centomila collisioni al secondo. Miglioramenti tecnologici, previsti entro gli anni Novanta, incrementeranno questi numeri fino a dieci volte tanto.

Nel 1990 la macchina per collisioni tra pi e pi meno del CERN è andata in pensione, lasciando il campo libero al Fermilab e ai suoi due potenti rivelatori.

Guardando dentro la scatola nera: i rivelatori

Noi studiamo il mondo subnucleare osservando, misurando e analizzando le collisioni indotte da particelle ad alta energia. Ernest Rutherford aveva chiuso a chiave i suoi collaboratori in una camera oscura così che potessero contare le scintille provocate dalle particelle alfa che colpivano schermi di solfuro di zinco. Le nostre tecniche

d'osservazione si sono considerevolmente evolute da allora, specialmente dopo la seconda guerra mondiale.

Prima della guerra lo strumento principale era la camera a nebbia. Con essa Anderson scoprì il positrone, e se ne trovavano in tutti i laboratori che studiavano i raggi cosmici in giro per il mondo. Il mio compito all'Università della Columbia era quello di costruire una camera a nebbia che operasse con il ciclotrone Nevis. Io ero un acerbo studentello di dottorato, beatamente ignaro delle sottigliezze di queste apparecchiature e in competizione con gli esperti di Berkeley, del Cal Tech, di Rochester e altri posti del genere. Le camere a nebbia sono aggeggi sofisticati e delicati, suscettibili di essere rovinati da impurità che creano delle goccioline indesiderate che si confondono con quelle che lasciano le tracce delle particelle. Nessuno all'Università della Columbia aveva pratica di questi accidenti di rivelatori. Io lessi tutta la letteratura tecnica sull'argomento e adottai tutte le scaramanzie: pulire il vetro con idrossido di sodio e lavarlo con acqua distillata tre volte; far bollire il diaframma di gomma in alcol metilico al cento per cento; pronunciare gli appropriati incantesimi... Anche una preghierina non faceva male.

In preda alla disperazione, cercai anche un rabbino per benedire la mia camera a nebbia. Sfortunatamente, scelsi il rabbino sbagliato. Era un ortodosso, molto rigoroso, e quando gli chiesi di recitare una *brucha* (in ebraico, «benedizione») per la mia apparecchiatura volle sapere che cosa fosse una camera a nebbia. Io gli mostrai una foto ed egli si infuriò per il mio tentato sacrilegio. Provai allora con un rabbino conservatore, il quale, dopo aver visto la foto, chiese come funzionasse una camera a nebbia. Glielo spiegai. Egli ascoltò, annuì, si tirò la barba, ed infine disse tristemente che non poteva farlo. «La legge...» Così andai dal rabbino riformato. Stava giusto scendendo dalla sua Jaguar XKE quando arrivai a casa sua. «Rabbi, potete recitare una *brucha* per la mia camera a nebbia?» lo pregai. «*Brucha*?» mi rispose. «Che cos'è una *brucha*?» Come potete capire, ero un po' preoccupato.

Finalmente arrivò il gran giorno. A quel punto ogni cosa avrebbe dovuto funzionare, ma ogni volta che la camera entrava in azione, quello che ottenevo era un fumo bianco e denso. In quel frangente arrivò all'università Gilberto Bernardini, un vero esperto, e si mise a guardare da dietro le mie spalle. Mi chiese poi in un inglese molto approssimativo:

«Che cos'è quell'asta di ottone che penzola nella camera?»

«È la mia sorgente di radioattività» dissi io «per avere delle tracce. Ma tutto quello che ottengo è del fumo bianco.»

«Tirala fuori.»

«Tirarla fuori?»

«Sì, sì, *out*.»

La tirai fuori e, pochi minuti dopo... tracce! Bellissimi fili ondeggianti di sottili gocce che cadevano nella camera. Lo spettacolo più meraviglioso che avessi mai visto. Quello che era successo era che la mia sorgente di millicurie era troppo forte, così che riempiva la camera di ioni, ciascuno con la sua goccia. Il risultato: fumo bianco e denso. Non avevo bisogno di una sorgente radioattiva. Ci pensavano già i raggi cosmici, onnipresenti attorno a noi, a fornire gentilmente una radiazione sufficiente. *Ecco!**

La camera a nebbia si rivelò uno strumento molto produttivo perché si poteva fotografare la coda di sottili gocce che si formava lungo il percorso delle particelle che la attraversavano. Dotandola di un campo magnetico, si facevano curvare le tracce e misurando il raggio della curvatura si ricavava il momento delle particelle: minore il raggio, maggiore l'energia. (Ricordate i protoni del ciclotrone di Lawrence, che, come guadagnavano in momento, descrivevano circoli più grandi.) Scattammo migliaia di fotografie che rivelarono una quantità di dati circa le proprietà dei pioni e dei muoni. La camera a nebbia – vista come uno strumento piuttosto che come un mezzo per guadagnarmi un dottorato e un posto all'università – ci permetteva di osservare qualche dozzina di tracce in ogni fotografia. I pioni impiegano circa un miliardesimo di secondo per passare attraverso la camera. Possiamo mettere una piastra di materiale denso sulla quale può aver luogo una collisione ogni cento fotografie. Poiché le foto possono essere scattate a un ritmo di solo una al minuto, la raccolta dei dati è così ancor più limitata.

Bolle, bolle, fatiche e guai

Il successivo passo avanti fu la camera a bolle, inventata alla metà degli anni Cinquanta da Donald Glaser, allora all'Università del Michigan. La prima camera a bolle era un piccolo tubo metallico pieno di etere liquido. L'evoluzione delle camere a idrogeno liquido, che sfociò nella realizzazione del mostro enorme di quattro metri e mezzo andato in pensione nel 1987 al Fermilab, avvenne sotto la guida del celebre Louis Alvarez all'Università della California.

In un recipiente pieno di liquido, spesso idrogeno liquefatto, lun-

* In italiano nel testo.

go il passaggio delle particelle si formano delle bollicine. Esse indicano un inizio di bollore dovuto a un deliberato e subitaneo calo di pressione nel liquido. Ciò provoca l'innalzamento termico del liquido sopra il punto di ebollizione, che dipende sia dalla temperatura sia dalla pressione. (Può darsi che abbiate sperimentato quanto sia difficile cuocere un uovo nel vostro chalet di montagna. Poiché in cima a una montagna la pressione è più bassa, l'acqua bolle a molto meno di 100 gradi centigradi.) Un liquido più puro, non importa quanto caldo, resisterà all'ebollizione. Per esempio, se riscaldate dell'olio in una pentola al di sopra della sua temperatura di ebollizione, e se la pentola è veramente pulita, non bollirà. Ma gettatevi una patatina, e immediatamente avrete una furiosa ebollizione. Per produrre bolle, ci vogliono due cose: temperatura sopra il punto di ebollizione e qualche genere di impurità che incoraggi la formazione della bolla. Nella camera a bolle, il liquido è surriscaldato dall'improvviso abbassamento della pressione. La particella carica, nel corso delle sue numerose e lievi collisioni con gli atomi del liquido, lascia una scia di atomi eccitati i quali, dopo che la pressione è diminuita, sono ideali per costituire il nucleo di una bolla. Se nel recipiente ha luogo una collisione fra la particella incidente e un protone (nucleo di idrogeno), tutte le particelle cariche che ne emergono sono rese visibili. Dato che il mezzo è un liquido, delle piastre dense non sono più necessarie, e i punti di collisione possono essere visti chiaramente. I ricercatori di tutto il mondo hanno scattato milioni di fotografie di collisioni nelle camere a bolle, aiutati da scanner automatici.

Il tutto funziona così: l'acceleratore «spara» un fascio di particelle nella camera a bolle. Se è un fascio di particelle cariche, dieci o venti tracce cominciano ad affollarsi nella camera. Un millisecondo o giù di lì dopo il passaggio delle particelle, un pistone abbassa rapidamente la pressione e cominciano così a formarsi le bolle. Dopo un altro millisecondo o giù di lì, si fotografa con un flash, poi si toglie la pellicola, e siamo pronti per un altro giro.

Si narra che Glaser (il quale vinse il Nobel per la sua camera a bolle e subito dopo si diede alla biologia) ebbe l'idea mentre si dedicava ad aumentare la schiuma in un bicchiere di birra aggiungendovi del sale. I bar di Ann Arbor, nel Michigan, sono così stati testimoni della nascita di una delle apparecchiature di maggior successo mai usate nella caccia alla particella di Dio.

Sono due le chiavi per l'analisi delle collisioni: lo spazio e il tempo. Noi vorremmo registrare la traiettoria di una particella nello

spazio e il tempo preciso del suo passaggio. Per esempio, una particella arriva nel rivelatore, si ferma, decade e dà origine a una particella secondaria. Un buon esempio è il muone, che decade in un elettrone un milionesimo circa di secondo dopo essersi fermato. Più preciso è il rivelatore, più informazione si ottiene. Le camere a bolle sono eccellenti per l'analisi spaziale dell'evento. Le particelle lasciano tracce, e nelle camere a bolle possiamo localizzare dei punti su quelle tracce con un'approssimazione di un millimetro. Ma non danno informazione temporale.

I contatori a scintillazione possono localizzare le particelle sia nello spazio sia nel tempo. Costruiti in una materia plastica speciale, producono un lampo di luce quando vengono colpiti da una particella carica. I contatori sono avvolti in una plastica nera impenetrabile alla luce e ogni piccolo lampo luminoso viene convogliato in un fotomoltiplicatore elettronico che converte il segnale indicante il passaggio di una particella in un impulso elettronico ben chiaro. Sovrapponendo questo impulso a una sequenza di impulsi di un orologio elettronico, si può registrare l'arrivo di una particella con un'approssimazione di pochi miliardesimi di secondo. Se viene usato un certo numero di contatori, una particella ne colpirà diversi in successione, lasciando una serie di impulsi che descrivono il suo percorso nello spazio. La localizzazione spaziale dipende dalle dimensioni del contatore, che generalmente la stabilisce con un'approssimazione di pochi centimetri.

Un passo avanti decisivo è stato reso possibile dalla camera proporzionale a fili (*Proportional Wire Chamber*, PWC), invenzione di un prolifico signore francese del CERN, Georges Charpak, eroe della Resistenza e reduce dai campi di concentramento. Nella sua PWC, un apparecchio ingegnosamente «semplice», qualche centinaio di sottili fili metallici, lunghi sessanta centimetri, sono avvolti, distanziati solo di pochi millimetri, attorno a un telaio di sessanta centimetri per centoventi. I voltaggi sono predisposti in modo tale che, quando una particella passa vicino a un filo, genera in esso un impulso elettrico che viene registrato. La posizione del filo colpito localizza un punto nella traiettoria. Il tempo dell'impulso si ottiene comparandolo con un orologio elettronico. Con ulteriori raffinamenti, spazi e tempi possono essere approssimati fino a 0,1 millimetri e 10^{-8} secondi. Con diversi di questi apparati disposti in un contenitore a tenuta stagna riempito di un gas appropriato, si possono stabilire con grande accuratezza le traiettorie delle particelle. Poiché la camera è attiva per un breve intervallo di tempo, l'interferenza di eventi casuali di fondo è eliminata e possono essere impiegati dei fasci molto intensi. La PWC è entrata in

tutti i grandi esperimenti di fisica delle particelle dal 1970 in poi, e nel 1992 è stato assegnato a Charpak (e a lui solo!) il Nobel per la fisica.

Tutti questi diversi sensori di particelle e altri ancora sono stati incorporati nei sofisticati rivelatori degli anni Ottanta. Il rivelatore CDF del Fermilab è uno dei sistemi fra i più complessi. Alto tre piani, pesante 5000 tonnellate, del valore di 60 milioni di dollari, serve per osservare le collisioni frontali fra protoni e antiprotoni nel Tevatron. Qui qualcosa come 100.000 sensori, fra i quali contatori a scintillazione e PWC, assemblati con ardite soluzioni ingegneristiche, inviano ondate di informazioni sotto forma di impulsi elettronici a un sistema che le organizza, le filtra e infine registra i dati per tenerli a disposizione di analisi future.

In tutti questi rivelatori c'è troppa informazione per essere elaborata in tempo reale – cioè immediatamente –, così i dati vengono codificati in forma digitale e organizzati per essere registrati su nastro magnetico. Il computer deve decidere quali collisioni sono «interessanti» e quali no, dal momento che nel Tevatron ne avvengono più di 100.000 al secondo, e ci si aspetta che questo numero arrivi a un milione al secondo nei primi anni Novanta. La maggior parte di queste collisioni non sono veramente interessanti. Quelle buone sono quelle in cui un quark in un protone urta davvero un antiquark o anche un gluone nel pi meno. Queste collisioni «dure» sono rare.

Il sistema che deve elaborare l'informazione ha meno di un milionesimo di secondo a disposizione per esaminare una particolare collisione e prendere una decisione fatale: è un evento interessante? Questa è una velocità da capogiro per la mente umana, ma non per un computer. Tutto è relativo. In una grande città una tartaruga venne rapinata da una banda di lumache. Interrogata dalla polizia, disse: «Non so, è successo tutto così in fretta!».

Per agevolare il lavoro del «decisore elettronico», è stato sviluppato un sistema di livelli di selezione degli eventi in sequenza. Gli sperimentatori programmano il computer con diverse «spie», degli indicatori che dicono al sistema quali eventi registrare. Per esempio, una delle spie più comuni riguarda un evento che scarica una grande quantità d'energia nel rivelatore, perché è più probabile che accadano nuovi fenomeni alle alte energie piuttosto che alle basse. Come programmare queste spie è la domanda da un milione di dollari. Se sono poco selettive, esauriremo presto le capacità di elaborazione e le capacità logiche del sistema. Se sono troppo selettive, si rischia di perdere qualche nuovo fenomeno, o si può aver fatto l'intero esperimento per niente. Alcune spie si accenderanno quando un elettrone

particolarmente energetico emerge dalla collisione. Un'altra sarà attivata dalle ridotte dimensioni di un flusso di particelle, e così via. Ci sono in genere dalle dieci alle venti differenti configurazioni di una collisione che possono «accendere» una spia. Il numero totale di eventi segnalati da queste spie può essere di 5000 o 10.000 al secondo, ma questo ritmo di passaggio degli eventi (uno ogni decimillesimo di secondo) è abbastanza basso perché adesso si abbia il tempo – cioè il computer abbia il tempo – di esaminare i candidati più attentamente. Vuoi veramente registrare questo evento? L'esame va avanti per quattro o cinque livelli fino a che si scende a un ritmo di circa dieci eventi al secondo.

Ognuno di questi eventi viene registrato in tutti i dettagli su un nastro magnetico. Spesso, quando viene presa la decisione di scartare degli eventi, viene prelevato un campione di questi, diciamo uno su cento, per esaminarlo in futuro e decidere se dell'informazione importante sia stata persa. L'intero sistema di acquisizione dei dati (*Data Acquisition System*, DAQ) è reso possibile da una tutt'altro che santa alleanza tra fisici che pensano di sapere che cosa vogliono, abili ingegneri elettronici che lavorano duro per soddisfare i primi, e la rivoluzione dei semiconduttori nell'industria microelettronica.

I geni di questa tecnologia sono troppo numerosi per poterli elencare ma, dal mio punto di vista, uno dei più notevoli fu un timido ingegnere elettronico che stava in un sottotetto del Nevis Lab all'Università della Columbia, dove io sono cresciuto. William Sippach era più avanti dei fisici che lo dirigevano. Noi parlavamo del DAQ, lui lo progettava e lo costruiva. Quante volte gli telefonai alle tre del mattino gridando che ci eravamo imbattuti in serie limitazioni del suo sistema elettronico (era sempre il *suo* sistema, quando c'erano guai). Lui ascoltava con calma e poi chiedeva: «Vedi un piccolo interruttore a destra, sul quadro sedici? Azionalo, e il tuo problema sarà risolto. Buonanotte». La fama di Sippach si diffuse, e quasi tutte le settimane c'erano visitatori da New Haven, Palo Alto, Ginevra e Novosibirsk per fare quattro chiacchiere con Bill.

Sippach e gli altri come lui che hanno contribuito a sviluppare questi sistemi complessi continuano una grande tradizione iniziata negli anni Trenta e Quaranta, quando furono inventati i circuiti per i primi rivelatori di particelle. Questi, a loro volta, divennero gli ingredienti base della prima generazione di computer digitali. Questi, a loro volta, contribuirono a creare acceleratori e rivelatori migliori, che contribuirono...

I rivelatori sono la fine della nostra storia degli acceleratori.

Adesso sapete tutto quello che dovete sapere sugli acceleratori, forse di più. Probabilmente ne sapete di più della maggioranza dei fisici teorici. Questa non vuole essere una critica, ma solo una constatazione. La cosa più importante è che cosa queste macchine ci dicono sul mondo.

Come detto sopra, i sincrociclotroni degli anni Cinquanta ci permisero di imparare molto sui pioni. La teoria di Hideki Yukawa suggeriva che cambiando una particella con una massa particolare si poteva creare una controforza attrattiva forte che avrebbe legato protoni a protoni, protoni a neutroni e neutroni a neutroni. Yukawa predisse la massa e il tempo di vita di questa particella di scambio: il pione.

Il pione ha un'energia della massa a riposo di 140 MeV, e venne prodotto abbondantemente nelle macchine da 400 e 800 MeV dei campus universitari sparsi per il mondo negli anni Cinquanta. I pioni decadono in muoni e neutrini. Il muone, il grande problema di quegli anni Cinquanta, sembrava essere una versione più pesante dell'elettrone. Richard Feynman fu uno di quegli eminenti scienziati che sparsero lacrime e sangue su due oggetti che si comportano in maniera identica sotto tutti i rispetti, eccettuato il fatto che uno pesa duecento volte più dell'altro. Svelare questo mistero è una delle chiavi dell'intera faccenda, l'indizio per risolvere il mistero della particella di Dio.

La generazione successiva di macchine produsse una sorpresa generazionale: colpire i nuclei con particelle a *miliardi* di volt faceva succedere «qualcosa di differente». Ripassiamo che cosa potete fare con un acceleratore, soprattutto perché gli esami finali sono vicini. In sostanza, il massiccio investimento di genialità umana descritto in questo capitolo – lo sviluppo del moderno acceleratore e rivelatore di particelle – ci permette di fare due cose: *disperdere* degli oggetti o – e questo è il «qualcosa di differente» – *produrre nuovi oggetti*.

1. *Dispersione*. Negli esperimenti di dispersione guardiamo come le particelle incidenti si disperdano in varie direzioni dopo la collisione. Il termine tecnico per il prodotto finale di un esperimento di dispersione è «distribuzione angolare». Quando sono analizzati secondo le regole della fisica quantistica, questi esperimenti ci dicono molto sul nucleo che sta disperdendo le particelle. Con il crescere dell'energia delle particelle che arrivano dall'acceleratore, la struttura si delinea sempre meglio. In questo modo studiamo la composizione del nucleo, neutroni e protoni, e come sono combinati e come

si arrangiano per conservare la loro struttura. E aumentando l'energia dei nostri protoni possiamo «vedere» dentro i protoni stessi e i neutroni. Come scatole cinesi.

Per fare le cose semplici, possiamo usare protoni singoli (nuclei di idrogeno) come bersagli. Gli esperimenti di dispersione ci parlano delle dimensioni del protone e di come sia distribuita la carica elettrica. Un lettore attento chiederà se la sonda usata – la particella che colpisce il bersaglio – non contribuisca anch'essa alla confusione, e la risposta è sì. Per questo usiamo sonde diverse. Le particelle alfa hanno ceduto il passo ai protoni e agli elettroni sparati dagli acceleratori, che sono stati seguiti da particelle derivate in seconda istanza: fotoni derivati da elettroni, pioni derivati da collisioni fra protoni e nuclei. E poiché siamo diventati più bravi nel fare queste cose negli anni Sessanta e Settanta, abbiamo cominciato a usare come sonde particelle derivate in terza istanza: muoni ottenuti dal decadimento di pioni, e neutrini e molte altre ancora.

Il laboratorio dell'acceleratore è diventato un centro di servizi con una varietà di prodotti. Per la fine degli anni Ottanta il dipartimento vendite del Fermilab pubblicizzava, per tutti i potenziali clienti, i seguenti prodotti: protoni, neutroni, pioni, kaoni, muoni, neutrini, antiprotoni, iperoni, protoni polarizzati (tutti con lo spin nella stessa direzione), fotoni etichettati (conosciamo la loro energia), e se c'è qualcos'altro che desiderate, chiedete pure!

2. *Produzione di nuove particelle*. L'obiettivo è adesso vedere se nuovi livelli energetici danno luogo alla creazione di nuove (e mai viste prima) particelle. E se c'è una nuova particella, vogliamo conoscere tutto di lei, massa, spin, carica, famiglia, e così via. Dobbiamo anche conoscere il suo tempo di vita e quali altre particelle risultino dal suo decadimento. Naturalmente, dobbiamo conoscere il suo nome e la parte che recita sulla grande scena del mondo delle particelle. Il pione venne scoperto nei raggi cosmici, ma presto scoprimmo che non era un prodotto di quello che succedeva nella camera a nebbia. Quello che succede è che i protoni dei raggi cosmici provenienti dallo spazio profondo penetrano nell'atmosfera terrestre dove entrano in collisione con i nuclei d'azoto e di ossigeno (e oggi abbiamo anche altre sostanze inquinanti presenti nell'atmosfera), e i pioni sono creati da queste collisioni. Altri oggetti misteriosi sono stati identificati nei raggi cosmici, come delle particelle chiamate K^+ e K^- e altre chiamate lambda (la lettera greca Λ). Quando entrarono in funzione acceleratori più potenti, a partire dalla metà degli anni Cinquanta, e poi nella grande corsa alle alte energie degli anni Sessanta, vennero

create diverse esotiche particelle. Divennero ben presto un'alluvione: le enormi energie disponibili nelle collisioni rivelarono l'esistenza non di una o di cinque o di dieci, ma di centinaia di nuove particelle, più di quante la nostra filosofia potesse mai sognare, o Orazio! Queste scoperte furono il frutto di sforzi di gruppo, della «big science» e della fioritura di tecnologie e di tecniche sperimentali nella fisica delle particelle.

A ogni nuovo oggetto venne dato un nome, in genere una lettera dell'alfabeto greco. Gli scopritori, normalmente si tratta di un gruppo di sessantatré scienziati e mezzo, annunciano la lieta novella e comunicano tutte le proprietà del nuovo oggetto che si conoscono: massa, carica, spin, tempo di vita e una lunga lista di altre proprietà quantiche. Poi passano con il cappello, raccolgono un paio di centinaia di dollari, scrivono un paio di tesi e aspettano di essere invitati per tenere seminari, conferenze, essere sponsorizzati, eccetera. Molti di loro si danno da fare perché altri scienziati confermino le loro scoperte, preferibilmente usando tecniche differenti così da minimizzare gli errori di misura. Ciascun acceleratore, con i suoi rivelatori, tende a «vedere» gli eventi in un modo peculiare. Per questo c'è bisogno di confermare l'evento facendolo osservare da occhi diversi.

La camera a bolle era una tecnica efficiente per scoprire particelle poiché molti dettagli di un incontro ravvicinato potevano esservi osservati e misurati. Esperimenti che facevano uso di rivelatori elettronici erano finalizzati a obiettivi più specifici. Una volta che una particella veniva aggiunta alla lista degli oggetti confermati, si potevano preparare collisioni e apparati specificamente rivolti a fornire dati sulle sue proprietà, come il tempo di vita – tutte le nuove particelle erano instabili – e i modi del decadimento. In che cosa si disintegra? Una lambda decade in un protone e un pione; una sigma decade in una lambda e un pione; e così via. Tabulare, organizzare, cercare di non finire affogati dai dati. Queste erano le regole per conservare la sanità mentale nel momento in cui il mondo subnucleare si mostrava sempre più complesso. Tutte le particelle con un nome greco create nelle collisioni delle interazioni forti vennero collettivamente chiamate *adroni* – dalla parola greca per «pesante» – e ce n'erano a centinaia, e non per modo di dire. Non era quello che volevamo. Invece di una singola, piccola, indivisibile particella, la ricerca dell'a-tomo di Democrito aveva portato a trovare centinaia di particelle molto pesanti e divisibili. Un disastro! Avevamo dovuto imparare dai nostri colleghi biologi che cosa fare quando non si sa che cosa fare: classificare! E questo facemmo con trasporto. I risultati – e le conseguenze – di quest'opera di classificazione saranno visti nel prossimo capitolo.

Tre finali: la macchina del tempo, le cattedrali e l'acceleratore orbitale

Concluderemo questo capitolo con un nuovo punto di vista su quello che succede nelle collisioni dentro gli acceleratori. Questo punto di vista ci è gentilmente concesso dai nostri colleghi astrofisici (ce n'è un piccolo ma molto spassoso manipolo nascosto al Fermilab). Queste persone ci assicurano – e non abbiamo ragione di dubitare – che il mondo venne creato circa 15 miliardi di anni fa con un'esplosione primordiale, il Big Bang. Nei primissimi istanti dopo la creazione, l'universo in fasce era un brodo caldo e denso di particelle primordiali, che si scontravano fra loro a energie (equivalenti a temperature) molto al di là di qualsiasi cosa noi possiamo anche solo immaginare di riprodurre, anche in preda ai più deliranti eccessi di megalomania. Ma l'universo si raffredda, man mano che si espande. A un certo momento, circa 10^{-12} secondi dopo la creazione, l'energia media delle particelle nel brodo universale si era ridotta a mille miliardi di elettronvolt, ovvero 1 TeV, circa la stessa energia che il Tevatron del Fermilab produce con ogni fascio. Perciò possiamo guardare agli acceleratori come a macchine del tempo. Il Tevatron riproduce, per il breve istante in cui si svolge una collisione frontale fra protoni, il comportamento dell'intero universo all'età di «un milionesimo di un milionesimo di secondo». Possiamo calcolare l'evoluzione dell'universo, se conosciamo le leggi della fisica che valgono in ogni epoca e le sue condizioni iniziali, trasmesse dall'epoca precedente.

Questa interpretazione in termini di macchina del tempo è un bel problema per gli astrofisici. In circostanze normali, noi fisici delle particelle dovremmo essere sì divertiti e stupiti di come gli acceleratori simulino gli inizi dell'universo, ma non dovremmo preoccuparcene molto, professionalmente. Negli ultimi anni, però, abbiamo cominciato a vedere una luce. Indietro nel tempo, là dove le energie sono considerevolmente più alte che 1 TeV – il limite delle nostre attuali capacità – giace un segreto al quale aspiriamo. Il primitivo e incandescente universo contiene un indizio vitale per scoprire il nascondiglio della particella di Dio.

L'acceleratore come macchina del tempo – la relazione con gli astrofisici – è un punto di vista da considerare. Un altro è suggerito

dal cowboy costruttore di acceleratori, Robert Wilson, il quale ha scritto:

> Non vi è da stupirsi che considerazioni di tipo estetico e tecnico fossero inestricabilmente connesse [nella progettazione del Fermilab]. Se vogliamo, esiste anche una strana similarità fra una cattedrale e un acceleratore: l'una destinata a svettare nello spazio, l'altro a raggiungere sommità comparabili nelle energie. È certo che il fascino estetico esercitato da ambedue le strutture si spiega soprattutto in termini di tecnica. Nella cattedrale lo vediamo nella funzionalità della costruzione ad arco ogivale, dove la spinta e la controspinta sono materializzate così vividamente e artisticamente e usate in maniera così drammatica. Anche nell'acceleratore c'è un'estetica della tecnologia. Nella spirale delle orbite una spinta elettrica e una controspinta magnetica cooperano a raggiungere l'espressione finale, questa volta sotto forma di un lucente fascio di particelle carico d'energia.
>
> Trasportato dal paragone, mi spinsi ancora più innanzi nel comparare le due imprese, e notai un'impressionante somiglianza fra la ristretta cerchia dei costruttori di cattedrali e la comunità dei costruttori di acceleratori: gli uni e gli altri audaci innovatori, acerrimi rivali nello stesso paese, ma fondamentalmente cosmopoliti. Mi piace comparare il grande *maître d'oeuvre*, Suger di Saint-Denis, con Cockcroft di Cambridge; Maurice de Sully di Notre-Dame con Lawrence di Berkeley; e Villard de Honnecourt con Budker di Novosibirsk.

A queste parole posso solo aggiungere che esiste un legame ancora più profondo: sia le cattedrali sia gli acceleratori sono monumenti alla fede molto costosi. Entrambi promettono un elevamento spirituale, la trascendenza e, pregando molto, la rivelazione. Ovviamente, non tutte le cattedrali mantengono le promesse.

Uno dei grandi momenti che si possono vivere nel nostro ramo d'affari è quello che vede i grandi capi chini sugli schermi della console, nella sala di controllo affollata, il giorno dell'entrata in funzione di un acceleratore. Ogni cosa è al suo posto. Le fatiche di tanti scienziati e ingegneri stanno per dare i loro frutti dopo tanti anni, quando il fascio uscirà dal recipiente di idrogeno per passare nelle intricate viscere... Funziona! Ecco il fascio! Neanche il tempo di gridare urrà e lo champagne scorre nei bicchieri di plastica, mentre il giubilo e l'estasi si dipingono sulle facce dei presenti. Così io mi immagino gli operai che calavano l'ultima statua al suo posto nella nicchia, mentre preti, vescovi, cardinali e Quasimodo, il gobbo di Notre-Dame, si affollavano emozionati attorno all'altare.

Bisogna considerare le qualità estetiche di un acceleratore, e non solo i suoi GeV e altri attributi tecnici. Fra qualche migliaio d'anni, gli archeologi e gli antropologi potranno giudicare la nostra cultura attraverso i nostri acceleratori. Dopotutto, si tratta delle più grandi

macchine costruite dalla nostra civiltà. Noi visitiamo oggi Stonehenge o le grandi piramidi e ci meravigliamo della loro bellezza e delle capacità tecnologiche richieste per costruirle. Ma tali strutture avevano anche una finalità scientifica: erano dei primitivi osservatori astronomici. Perciò dobbiamo anche ammirare il fatto che queste antiche civiltà costruivano delle grandi strutture per misurare il movimento dei cieli, spinte dal desiderio di conoscere e di vivere in armonia con l'universo. Forma e funzione erano combinate insieme nelle piramidi e a Stonehenge per permettere ai loro costruttori di cercare verità scientifiche. Gli acceleratori sono le nostre piramidi, la nostra Stonehenge.

Il terzo finale ha a che fare con l'uomo che ha dato il nome al Fermilab, Enrico Fermi, uno dei più famosi scienziati degli anni Trenta, Quaranta e Cinquanta. Italiano di nascita, il suo lavoro a Roma aveva visto brillanti risultati sia in campo teorico sia in campo sperimentale e il formarsi attorno a lui di un folto gruppo di studenti eccezionali, cresciuti dalle sue grandissime qualità di insegnante. Premio Nobel nel 1938, egli colse l'occasione della cerimonia di conferimento del premio per fuggire dall'Italia fascista e stabilirsi negli Stati Uniti.

La sua notorietà presso il vasto pubblico è dovuta al fatto che egli diresse il gruppo che costruì la pila nucleare che produsse la prima reazione a catena, a Chicago durante la seconda guerra mondiale. Nel dopoguerra, egli raccolse di nuovo attorno a sé, all'Università di Chicago, un brillante gruppo di allievi, fisici teorici e sperimentali. Gli studenti di Fermi, sia quelli di Roma sia quelli di Chicago, sono andati in giro per il mondo a ottenere cattedre prestigiose e a conseguire riconoscimenti scientifici. «Si può riconoscere un buon insegnante da quanti suoi studenti hanno vinto il premio Nobel» dice un vecchio proverbio azteco.

Nel 1954 Fermi pronunciò il suo discorso d'addio come presidente della Società americana di fisica. Metà sul serio e metà per scherzo, egli predisse che in un prossimo futuro avremmo costruito un acceleratore in orbita intorno alla Terra, per sfruttare il vuoto naturale che esiste nello spazio. Fece anche presente, con molta buona volontà, che lo sforzo finanziario non avrebbe superato i bilanci della difesa di Stati Uniti e Unione Sovietica messi insieme. Usando supermagneti e la mia calcolatrice tascabile, posso stimare una potenza di 50.000 TeV a un costo di diecimila miliardi di dollari, senza contare le economie di scala possibili. Quale miglior maniera di curare la follia del mondo che trasformare spade in acceleratori?

Interludio C

Come violammo la parità in un weekend... e scoprimmo Dio

> Non posso credere che Dio sia leggermente mancino.
>
> WOLFGANG PAULI

Guardatevi allo specchio. Non male, vero? Immaginate di alzare la vostra mano destra, e che anche la vostra immagine allo specchio alzi la sua mano destra! Cosa? Non può essere. Volete dire sinistra! Sareste piuttosto sorpresi se si alzasse la mano sbagliata. Non è mai successo, a memoria d'uomo. Ma qualcosa di equivalente è successo con una particella fondamentale chiamata muone.

La simmetria speculare era stata verificata in laboratorio più e più volte. Il suo nome scientifico è conservazione della parità. Questa è la storia di un'importante scoperta, e anche di come il progresso spesso richieda il ripudio di una bellissima teoria da parte di un brutto fatto. Tutto cominciò un venerdì all'ora di pranzo e finì per le quattro del mattino del martedì successivo. Un'idea molto radicata di come la natura si comporti si era rivelata essere un (piccolo) fraintendimento. In poche, intense ore passate in laboratorio, la nostra comprensione del modo in cui l'universo è costruito era cambiata per sempre. Quando delle eleganti teorie vengono rigettate c'è sempre del disappunto, perché dobbiamo riconoscere che la natura è più malfatta, e potente, di quanto desidereremmo. Ma la nostra delusione viene mitigata dalla fede che un'analisi più approfondita ci rivelerà una bellezza nascosta. E così fu con la caduta della parità, in pochi giorni di gennaio del 1957, a Irvington-on-Hudson, trenta chilometri a nord di New York.

I fisici amano la simmetria, per la sua bellezza sia matematica sia intuitiva. In arte, la simmetria è esemplificata dal Taj Mahal o da un tempio greco. In natura, conchiglie, piccoli animali e cristalli di vario tipo esibiscono delle simmetrie di grande bellezza, come la esibisce la pressoché perfetta rispondenza bilaterale del corpo umano. Le leggi della natura contengono un ricco insieme di simmetrie che per

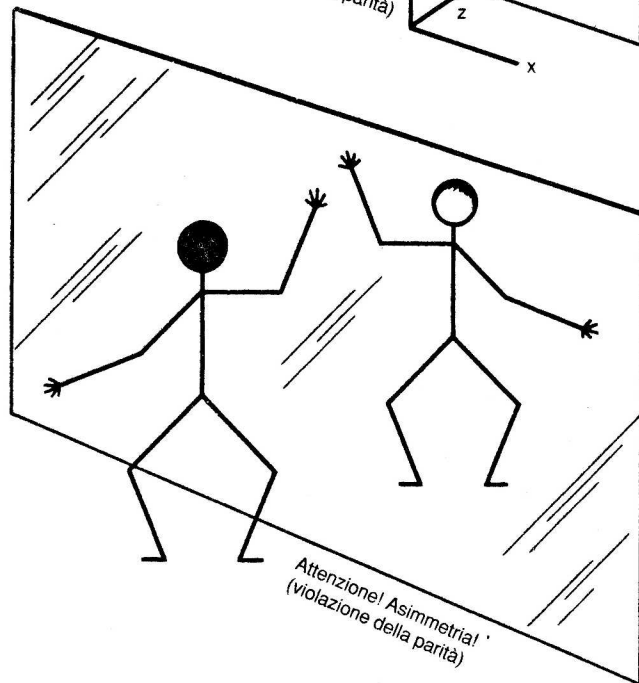
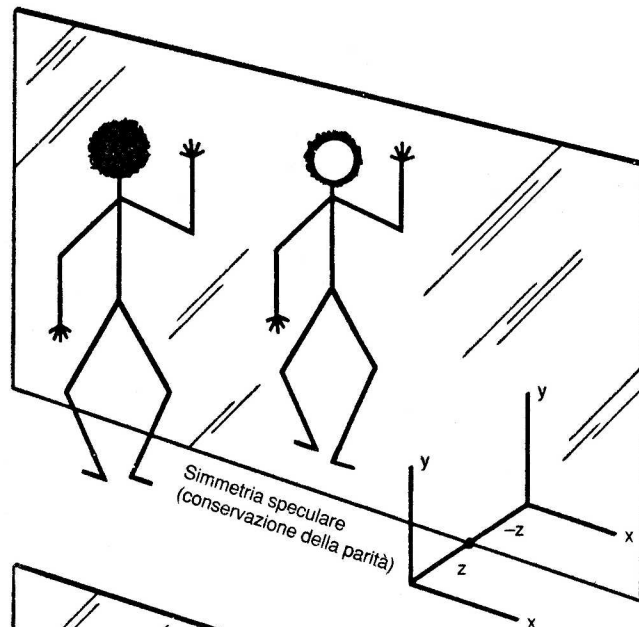
anni, almeno prima del gennaio del 1957, si pensava fossero assolute e perfette. Erano state immensamente utili per capire i cristalli, le grosse molecole, gli atomi e le particelle.

L'esperimento nello specchio

Una di queste simmetrie si chiamava simmetria speculare, o conservazione della parità, e asseriva che la natura – o meglio, le leggi della fisica – non potevano fare distinzioni fra gli eventi del mondo reale e quelli nello specchio.

L'enunciato matematico corretto, che darò per la storia, dice che le equazioni che descrivono le leggi di natura non cambiano quando si sostituiscano le coordinate z di tutti gli oggetti con $-z$. Se l'asse z che definisce un piano è perpendicolare a uno specchio, questa sostituzione è esattamente quella che si verifica per qualsiasi sistema riflesso nello specchio. Per esempio, se voi, o un atomo, state a 16 unità di misura di fronte allo specchio, lo specchio mostra l'immagine a 16 unità dietro la sua superficie. La sostituzione della coordinata z con $-z$ crea un'immagine speculare. Comunque, se le equazioni sono invarianti rispetto a questa sostituzione (per esempio, se la coordinata z compare sempre nell'equazione come z^2), allora la simmetria speculare è valida e la parità conservata.

Se una parete di un laboratorio fosse uno specchio e gli scienziati nel laboratorio stessero conducendo degli esperimenti, allora la loro immagine speculare rifletterebbe l'immagine speculare di questi esperimenti. C'è un modo per decidere qual è il vero laboratorio e quale il laboratorio speculare? C'è qualche test oggettivo con il quale Alice potrebbe sapere dove si trova, davanti o dietro lo specchio? Un comitato di eminenti scienziati potrebbe stabilire, esaminando un video, se un esperimento sia stato condotto nel laboratorio reale o in quello speculare? Nel dicembre 1956 l'inequivoca risposta era no. Non c'era modo di provare che un comitato di esperti stesse guardando l'immagine allo specchio degli esperimenti condotti nel laboratorio reale. A questo punto, un acuto profano potrebbe dire: «Un momento, gli scienziati nel video hanno tutti i bottoni a sinistra: deve essere l'immagine allo specchio». «No» risponderebbero gli scienziati, «questo è solo un uso; non c'è nulla nelle leggi di natura che obblighi i bottoni a stare a destra. Noi dobbiamo mettere da parte le idiosincrasie umane e decidere se vi sia qualcosa nel nostro video che vada contro le leggi della fisica.»

Prima del gennaio 1957 nessuna di tali violazioni era stata notata

nell'immagine speculare del mondo. Il mondo e la sua immagine allo specchio erano delle descrizioni della natura equivalenti. Qualsiasi cosa stesse succedendo nello spazio speculare poteva in linea di principio, e in pratica, venire riprodotta nello spazio del laboratorio. La parità era utile. Era d'aiuto nel classificare gli stati molecolari, atomici e nucleari. Risparmiava anche lavoro. Se un umano senza difetti se ne sta mezzo nascosto da uno schermo verticale, e spogliato, voi potete sapere piuttosto bene che cosa sta dietro lo schermo, giudicando solo dalla metà che potete vedere. Questa è la poesia della parità.

La «caduta della parità», come vennero battezzati i fatidici eventi del gennaio 1957, costituisce un esempio da manuale di come pensino i fisici, di come si adattino a scoperte sorprendenti, di come la teoria e la matematica ondeggino ai venti della misurazione e dell'esperimento. Quello che non è tipico di questa storia è la velocità e la relativa semplicità della scoperta.

Allo Shanghai Café

Venerdì 4 gennaio, a mezzogiorno. Il venerdì era il giorno fisso del pranzo cinese, e i membri del dipartimento di fisica dell'Università della Columbia si radunavano fuori dell'ufficio del professor Tsung Dao Lee. Fra i dieci e i quindici fisici si incolonnarono giù per la discesa che va dal Pupin Physics Building nella 120ª strada allo Shanghai Café fra la 125ª e Broadway. La tradizione dei pranzi del venerdì era cominciata nel 1953, quando Lee era arrivato all'università da Chicago con un dottorato di ricerca nuovo di zecca e una montante fama di stella della fisica teorica.

I pranzi del venerdì erano caratterizzati da rumorose e disinibite conversazioni, talvolta su tre o quattro argomenti contemporaneamente, interrotte solo per ingurgitare con rumorose manifestazioni di soddisfazione la zuppa di melone d'inverno, la fenice di carne di drago, le polpettine di gamberetti, i cetrioli di mare e altri esotici e piccanti cibi della cucina della Cina settentrionale, non ancora alla moda nel 1957. Già scendendo al ristorante era chiaro che il tema di quel venerdì avrebbe riguardato la parità e le notizie che erano arrivate calde calde dalla nostra collega C.S. Wu, che stava facendo un esperimento all'Ufficio dei pesi e delle misure di Washington.

Prima di cominciare a parlare di cose serie, T.D. Lee ottemperò al suo ufficio settimanale, che era quello di ordinare il menù su

una piccola cartella che il capocameriere rispettosamente gli porgeva. Quando T.D. ordina il menù, lo fa in grande stile: è una forma d'arte. Guarda la lista, poi la cartella, domanda qualcosa in mandarino al cameriere, aggrotta le ciglia, tiene la matita sospesa per un poco sul foglio, poi disegna attentamente alcuni ideogrammi. Un'altra domanda, un cambiamento in un ideogramma, un'occhiata al soffitto ornato di rilievi di stagno per invocare l'ispirazione degli dèi, e poi il rapido fluire della scrittura. Un riesame finale: ambedue le mani posate sulla cartella, una con le dita tese, per impartire la papale benedizione sulle turbe che assistono alla cerimonia, l'altra che regge la matita. C'è tutto? Lo yin e lo yang, il colore, la sostanza, il sapore, nel loro giusto equilibrio? La cartella e la matita vengono restituite al cameriere e T.D. si tuffa nella conversazione.

«Wu ha telefonato dicendo che i suoi dati preliminari indicano un grosso effetto!» disse tutto eccitato.

Torniamo per un momento al laboratorio (il mondo reale come Lei l'ha fatto) con una parete a specchio. La nostra esperienza normale è che tutto ciò che facciamo davanti allo specchio, qualsiasi esperimento facciamo nel laboratorio – produzione o dispersione di particelle, esperimenti sulla gravitazione come quelli di Galileo –, il suo riflesso nello specchio obbedirà alle stesse leggi di natura che valgono nel laboratorio. Vediamo come potrebbe manifestarsi una violazione della parità. Il più semplice test obiettivo, che potremmo comunicare agli abitanti del pianeta Twilo, fa uso di un trapano destrorso. Lo usiamo per avvitare una vite in senso orario. Se la vite penetra in un pezzo di legno, allora è destrorsa. Ovviamente, lo specchio mostra una vite sinistrorsa, perché il tipo nello specchio la sta girando in senso antiorario, ma comunque penetra sempre nel legno. Supponete adesso di vivere in un curioso mondo (un qualche universo alla «Star Trek») nel quale sia impossibile – contro le leggi della fisica – fare una vite sinistrorsa. Non si avrebbe più la simmetria speculare; l'immagine allo specchio di una vite destrorsa non potrebbe esistere; e la parità sarebbe violata.

Questa era l'introduzione per capire come Lee e il suo collega di Princeton Chen Ning Yang si proponessero di controllare la validità della legge per l'interazione debole. Ci voleva l'equivalente di una particella destrorsa (o sinistrorsa), e della combinazione di una *rotazione* e di un *movimento* in avanti, come nel caso del trapano. Si consideri una particella dotata di spin, diciamo un muone. La si raffiguri come un cilindro ruotante attorno al suo asse. Questa è la *rotazione*. Dato che gli estremi del cilindro-muone sono identici, non siamo in grado di dire se sta ruotando in senso orario oppure antiorario. Per convincervi di ciò, mettete il cilindro fra voi e vostra moglie (o vostro marito): se voi direte e spergiurerete che sta ruotando in senso orario, lei (o lui) dirà che sta ruotando in senso antiorario, e non c'è modo di decidere chi abbia ragione: questa è una situazione in cui la parità si conserva.

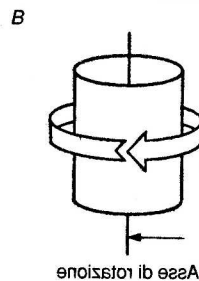
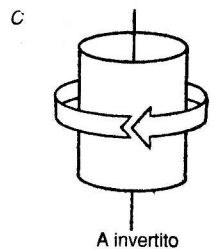
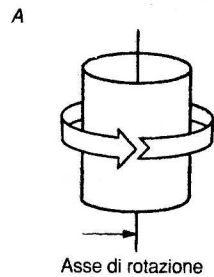
Il colpo di genio di Lee e Yang consistette nell'introdurre l'interazione debole (che era ciò che volevano esaminare) osservando il decadimento della particella ruotante. Uno dei prodotti del decadimento del muone è un elettrone. Supponiamo che la natura obblighi l'elettrone a venir fuori solo da una delle estremità del cilindro. Questo fatto ci dà una *direzione*. E adesso possiamo determinare il *senso* della rotazione – orario o antiorario – perché adesso una delle estremità è ben definita (quella da dove esce l'elettrone). Questa estremità fa le veci della punta del trapano. Se il senso della rotazione relativamente all'elettrone è destrorso, come il senso del trapano relativamente alla sua punta, abbiamo definito un muone destrorso. Ora, *se* queste particelle decadono sempre in modo da essere definite destrorse, abbiamo un processo che viola la simmetria speculare. Questo si vedrà se allineiamo l'asse di rotazione del muone parallelo al nostro specchio. L'immagine speculare è un muone sinistrorso, *qualcosa che non esiste*.

Le voci sui risultati dell'esperimento di Wu avevano cominciato a diffondersi durante le vacanze di Natale, ma quel venerdì dopo Capodanno cadeva la prima riunione del dipartimento di fisica dopo le vacanze. Nel 1957 Chien Shiung Wu, mia collega all'Università della Columbia, era una studiosa sperimentale di fama già consolidata. La sua specialità era il decadimento radioattivo del nucleo. Era esigente con i suoi studenti e assistenti, energica, attenta nel valutare i risultati e molto apprezzata per l'alta qualità dei dati pubblicati. I suoi studenti la chiamavano (senza farsi sentire da lei) «Generalissimo Madame Chiang Kai-shek».

Quando Lee e Yang lanciarono la sfida alla validità della legge della conservazione della parità, nell'estate del 1956, Wu si mise subito in azione. Scelse come oggetto di studio il nucleo radioattivo del cobalto 60, che è instabile. Il nucleo del cobalto 60 si muta spontaneamente in un nucleo di nichel, un neutrino e un elettrone positivo

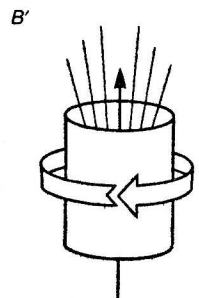
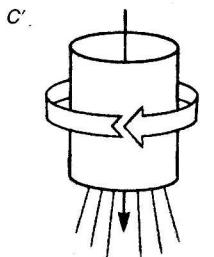
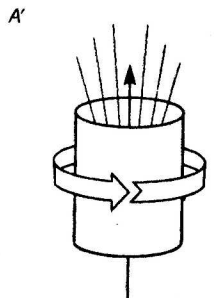
Laboratorio reale | Laboratorio speculare

A

B

A rappresenta una particella dotata di spin.
B è un'immagine speculare di *A*.
C corrisponde ad *A* invertito ed è perfettamente uguale a *B*; pertanto *B* corrisponde a un oggetto che si trova in natura, e la simmetria speculare è rispettata.

C

A′

B′

A′ raffigura un muone che decade. L'asse di rotazione è ora dotato di una freccia che indica la direzione d'emissione degli elettroni. I raggi indicano che gli elettroni «preferiscono» decisamente il moto destrorso.
B′, vale a dire l'immagine speculare, è un muone che decade con rotazione sinistrorsa. Se l'esperimento mostra che tutti i decadimenti muonici avvengono con direzione destrorsa, allora *B′* non esiste in natura.
Per esempio, invertendo *A′* si ottiene *C′*, che però non è una copia perfetta di *B′*. La simmetria speculare risulta pertanto violata.

C′

(un positrone). Quello che si «vede» è che il nucleo di cobalto improvvisamente emette un elettrone positivo. Questa forma di radioattività è conosciuta come decadimento beta, perché gli elettroni emessi durante il processo, sia positivi sia negativi, venivano chiamati in principio particelle beta. Perché ciò accade? I fisici la chiamano un'interazione debole, e ritengono che ci sia una forza operante in natura responsabile di queste reazioni. Le forze non solo spingono e tirano, attraggono e respingono, ma sono anche capaci di generare dei cambiamenti di specie, come la trasformazione del cobalto in nichel con la connessa emissione di leptoni. Dal 1930 in avanti un grande numero di reazioni era stato attribuito all'interazione debole. Enrico Fermi era stato il primo a dare a essa una forma matematica, riuscendo così a prevedere in dettaglio reazioni come quella del cobalto 60.

Nel loro articolo del 1956 intitolato «Il problema della conservazione della parità nell'interazione debole», Lee e Yang avevano selezionato un certo numero di reazioni ed esaminato le implicazioni sperimentali dell'ipotesi che la parità – la simmetria speculare – non fosse rispettata dall'interazione debole. Essi erano interessati alle direzioni in cui l'elettrone viene emesso da un nucleo ruotante. Se l'elettrone privilegia una direzione rispetto alle altre, è come se al nucleo di cobalto venisse messa una camicia con i bottoni: si potrebbe decidere qual è l'esperimento reale e quale la sua immagine speculare.

Che cosa distingue una grande idea dal lavoro scientifico di routine? Lo stesso ci si può chiedere di una poesia, di un quadro, di un brano musicale, persino di una sentenza di tribunale. Nel caso di un'opera d'arte, è il tempo che alla fin fine decide. Nella scienza, è l'esperimento che determina se un'idea è «giusta». Se è brillante, si apre una nuova area di ricerca, nuove domande vengono poste e un buon numero di vecchi problemi sono messi da parte.

La mente di T.D. Lee era sottile. Quando ordinava un pranzo, così come quando giudicava di un vecchio vaso cinese o di uno studente, le sue osservazioni avevano molte sfaccettature, come una pietra preziosa. Nell'articolo di Lee e Yang sulla parità (non conosco Yang così bene), la cristallina idea di base aveva molte facce. Ci vuole molta sottigliezza cinese per mettere in dubbio una consolidata legge di natura. Lee e Yang si resero conto che la grande massa di dati che appoggiava la legge della parità era in realtà irrilevante per quel frammento di natura che provocava il decadimento radioattivo, l'interazione debole. Questa era un'altra lucente

sfaccettatura: qui, per la prima volta a quanto mi risulta, alle differenti forze della natura si permetteva di avere differenti leggi di conservazione.

Lee e Yang si rimboccarono le maniche, fecero un bel sospiro e cominciarono a esaminare un gran numero di decadimenti radioattivi che rappresentavano dei possibili candidati per il controllo della simmetria speculare. Il loro articolo forniva laboriose e dettagliate analisi delle probabili reazioni così che gli ottusi sperimentali potevano controllare la simmetria speculare. Wu realizzò una versione di una di queste reazioni, usando il cobalto. La chiave del suo approccio stava nell'assicurarsi che i nuclei di cobalto – o almeno una buona parte di essi – ruotassero nello stesso senso. Wu pensava che ciò potesse essere assicurato portando il cobalto 60 a temperature molto basse: questo richiedeva delle apparecchiature criogeniche difficili da trovare. Per questo era arrivata fino all'Ufficio dei pesi e delle misure, dove le tecniche per allineare la rotazione erano molto sviluppate.

Sulla tavola era arrivata una grossa carpa cotta in salsa di fagioli rossi con scalogno e porri e Lee andava ripetendo la notizia più importante: l'effetto osservato da Wu era grande, più di dieci volte quello previsto teoricamente. I dati erano ancora provvisori, ma – T.D. mi servì la testa del pesce, perché sapeva che mi piacevano le guance – se l'ordine di grandezza fosse stato confermato, sarebbe stato quello che ci si sarebbe dovuti aspettare da neutrini con due componenti... Io mi persi il resto perché una certa idea aveva cominciato a spuntarmi in testa.

Dopo pranzo c'erano un seminario, alcune riunioni di dipartimento, un tè e un colloquio. Ma io ero sempre distratto, rimuginando sul fatto che Wu stava osservando «un grosso effetto». Dalla conferenza di Lee a Brookhaven in agosto mi ricordavo che gli effetti prodotti dalla supposta violazione della parità quando i pioni e i muoni decadono dovevano essere minuscoli.

Un grosso effetto? In agosto avevo fatto alcuni calcoli sulla catena di decadimento «pi-mu» (pione-muone) e avevo trovato che per realizzare un esperimento fattibile ci sarebbe stato bisogno di avere la violazione della parità in *due* reazioni in sequenza. Quei calcoli dicevano anche che le probabilità di avere due reazioni erano così poche che non sarebbe valso la pena imbarcarsi in un simile esperimento. Però, se l'effetto era grosso...

Alle sei del pomeriggio ero sulla mia automobile e mi dirigevo a

nord per cenare a casa a Dobbs Ferry, con la prospettiva di passare una tranquilla serata con un mio studente di dottorato nel vicino laboratorio di Nevis, a Irvington-on-Hudson. L'acceleratore da 400 MeV di Nevis produceva mesoni, particelle relativamente nuove negli anni Cinquanta. In quei bei giorni, c'erano pochi mesoni in circolazione, così Nevis si occupava anche di pioni: degli intensi fasci di pioni venivano fuori da un bersaglio bombardato da protoni. I pioni erano instabili, e mentre si allontanavano dal bersaglio, fuori dall'acceleratore, attraverso la parete protettiva, entrando nella camera per gli esperimenti, un venti per cento di essi decadeva in un muone e un neutrino.

$$\pi \rightarrow \mu + \nu$$

I muoni generalmente viaggiavano nella stessa direzione dei pioni genitori. Se la legge della parità fosse violata, ci sarebbe un eccesso di muoni con l'asse di rotazione allineato rispetto alla direzione del movimento in confronto al numero dei muoni che lo presenterebbero allineato in direzione opposta. Se l'effetto fosse *grande*, la natura potrebbe fornirci un campione di particelle tutte ruotanti nello stesso senso. Questa era la situazione che Wu cercava di produrre raffreddando il cobalto 60 a temperature molto basse dentro un campo magnetico. Il trucco stava nell'osservare quei muoni, dei quali si conosceva la direzione dell'asse di rotazione, decadere in un elettrone più qualche neutrino.

L'esperimento

L'intenso traffico sulla corsia nord dell'autostrada del Saw Mill River Park il venerdì sera impedisce di godersi la vista delle incantevoli colline coperte di boschi che fiancheggiano la strada che, risalendo il fiume Hudson, passa Riverdale, Yonkers e punta a nord. Fu da qualche parte lungo questa strada che le implicazioni del possibile «grosso effetto» mi furono improvvisamente chiare davanti agli occhi. Nel caso di un oggetto ruotante, l'effetto è che una direzione dell'asse di rotazione è privilegiata durante il decadimento. Un piccolo effetto potrebbe essere quello per cui 1030 elettroni vengono emessi in una direzione, relativamente all'asse di rotazione, contro 970 emessi nell'altra direzione, e questo sarebbe molto difficile da osservare. Ma dovrebbe invece essere molto più facile osservare un grosso effetto, diciamo 1500 contro 500, e lo stesso fortunato ordine

di grandezza sarebbe d'aiuto nell'organizzare le rotazioni dei muoni. Per fare l'esperimento abbiamo bisogno di un campione di muoni tutti ruotanti nella medesima direzione. Dal momento che questi si staranno muovendo dal ciclotrone verso il nostro apparato d'osservazione, ecco che abbiamo una direzione del moto dei muoni che faccia da riferimento per la loro rotazione. Abbiamo poi bisogno che la maggior parte dei muoni sia destrorsa (o sinistrorsa, non fa differenza) rispetto alla direzione del moto. I muoni arrivano, passano attraverso pochi contatori e si fermano in un blocco di carbonio. A questo punto contiamo quanti elettroni ne escono in una direzione e quanti nella direzione opposta. Una differenza significativa sarebbe una prova della violazione della parità. Gloria e ricchezza!

D'improvviso, la solitamente tranquilla sera del venerdì fu sconvolta dal pensiero che l'esperimento era banale da realizzare. Il mio dottorando Marcel Weinrich stava lavorando su un esperimento con i muoni. Il suo apparato, con delle semplici modifiche, poteva essere usato per cercare un grosso effetto. Ripassai mentalmente il modo in cui i muoni venivano creati nell'acceleratore dell'università. In questo campo ero un esperto, dato che avevo lavorato con John Tinlot nella progettazione dei fasci esterni di ioni e muoni qualche anno prima, quando ero un presuntuoso studente di dottorato e la macchina era nuova di zecca.

Visualizzai l'intero processo: l'acceleratore, un magnete di 4000 tonnellate con poli circolari di sei metri circa di diametro, tiene nel mezzo una grande scatola d'acciaio inossidabile, la camera a vuoto d'aria. Una corrente di protoni viene immessa con un sottile tubo nel centro del magnete. I protoni vengono fatti girare a spirale dalle pedate che rifilano loro a ogni passaggio i voltaggi delle radiofrequenze. Verso la fine di questi giri, le particelle hanno un'energia di 400 MeV. Al bordo della camera, quasi nel punto dove si uscirebbe dall'influenza del magnete, un piccolo monolito con un pezzo di grafite aspetta di essere bombardato dai protoni carichi d'energia. I loro 400 milioni di volt sono sufficienti per creare nuove particelle – i pioni – quando entrano in collisione con un nucleo di carbonio dentro il bersaglio di grafite.

Nella mia mente potevo vedere i pioni scagliati via dal momento dell'impatto del protone. Nati fra i poli del potente magnete del ciclotrone, essi descrivono un arco verso l'esterno dell'acceleratore e danzano la loro danza di morte; al loro posto appaiono i muoni, partecipi del moto iniziale dei pioni. Il campo magnetico che svanisce rapidamente fuori dai poli aiuta a convogliare i muoni attraverso un canale largo venticinque centimetri nella parete antiradiazioni e infine nella sala degli esperimenti dove *noi* stiamo aspettando.

Nell'esperimento che Marcel stava preparando, i muoni sarebbero stati rallentati in un filtro largo otto centimetri e infine fermati in blocchi di vari elementi da due centimetri e mezzo. Essi avrebbero perso la loro energia per mezzo di gentili collisioni con gli atomi del materiale, ed essendo carichi negativamente sarebbero stati alla fine catturati dai nuclei positivi. Dal momento che nell'esperimento sulla violazione della parità non volevamo che nulla influenzasse la direzione della rotazione dei muoni, farli catturare dentro delle orbite avrebbe potuto essere fatale, così dovevamo passare a muoni positivi. Che cosa avrebbero dovuto fare dei muoni positivi? Probabilmente sedersi lì tranquilli nel blocco, ruotando tranquillamente fino a che non fosse arrivato il tempo di decadere. Il materiale del blocco doveva essere scelto oculatamente, e il carbonio sembrava appropriato.

E adesso viene la grande idea avuta guidando verso il nord in un venerdì di gennaio. Se tutti (o quasi tutti) i muoni nati nel decadimento dei pioni potessero in qualche modo avere le loro rotazioni allineate nella stessa direzione, questo significherebbe che la parità è violata nella reazione pione-muone, e pure fortemente violata. Un grosso effetto! Supponiamo adesso che gli assi di rotazione rimangano paralleli alla direzione del moto del muone mentre descrive il suo grazioso arco verso l'esterno della macchina, attraverso il canale. (Se g è prossimo a 2, questo è esattamente quello che succede.) Supponiamo inoltre che le innumerevoli gentili collisioni con gli atomi di carbonio, che rallentano gradualmente il muone, non disturbino questa relazione fra rotazione e direzione. Se tutto ciò succedesse effettivamente, *mirabile dictu*, io avrei un campione di muoni in riposo dentro un blocco, tutti ruotanti nella medesima direzione!

Il tempo di vita del muone di due microsecondi andava bene. Il nostro esperimento era già rivolto a rilevare gli elettroni che emergono dai muoni in decadimento. Quello che potevamo fare era vedere se un ugual numero di elettroni emergesse nelle due direzioni definite dall'asse di rotazione. Il test della simmetria speculare. Se questi numeri non sono uguali, la parità è morta! E io l'avrei uccisa! Arggghh!

Sembrava che una coincidenza di miracoli sarebbe stata necessaria per il buon esito dell'esperimento. In effetti, era stato proprio il renderci conto di questa necessità che ci aveva scoraggiati in agosto, quando Lee e Yang avevano tenuto il seminario sul loro articolo, perché si aspettavano piccoli effetti. Avendo la pazienza sufficiente,

un piccolo effetto si può scoprire, ma due piccoli effetti in sequenza, ovvero, l'un per cento moltiplicato per un altro un per cento... questa era una cosa disperata. Perché due piccoli effetti in sequenza? Ricordate che la natura deve fornirci di pioni che decadano in muoni, la maggior parte dei quali ruotanti nello stesso senso (miracolo numero uno), e che poi i muoni devono decadere in elettroni provvisti di un'asimmetria osservabile rispetto all'asse di rotazione del muone (miracolo numero due).

Quando arrivai al casello autostradale di Yonkers (nel 1957 il pedaggio era di cinque centesimi) ero tutto eccitato. Mi sentivo piuttosto sicuro che, se la violazione della parità era su larga scala, i muoni sarebbero stati polarizzati (tutti ruotanti nella medesima direzione). Sapevo anche che le proprietà magnetiche della rotazione del muone erano tali da «orientare», sotto l'influenza del campo magnetico, la rotazione nella direzione del movimento della particella. Ero meno certo di quello che sarebbe successo al muone entrando nella grafite. Se mi sbagliavo, l'asse di rotazione del muone sarebbe stato distorto in un vasto assortimento di direzioni, nel qual caso non ci sarebbe stato modo di osservare l'emissione di elettroni relativamente all'asse di rotazione.

Ritorniamoci sopra un'altra volta. Il decadimento dei pioni genera dei muoni che ruotano nella direzione in cui si muovono. Questo fa parte del miracolo. Adesso dobbiamo fermare i muoni in modo da poter osservare la direzione degli elettroni che emettono decadendo a loro volta. Poiché noi conosciamo la direzione del loro moto appena prima che colpiscano il blocco di carbonio, se non c'è nulla che li fa girare in qualche modo strano, conosciamo anche la direzione della rotazione nell'attimo in cui si fermano e cominciano a decadere. Tutto quello che dobbiamo fare adesso per controllare la simmetria speculare è ruotare il nostro rivelatore di elettroni attorno al blocco in cui stanno i muoni.

Le palme delle mani cominciarono a sudare mentre riepilogavo quello che bisognava fare. I contatori c'erano già. L'apparecchiatura elettronica per segnalare l'arrivo dei muoni ad alta energia e l'ingresso nel blocco di grafite dei muoni rallentati, pure. Esisteva anche un «telescopio» con quattro contatori per il rilevamento degli elettroni emergenti dal decadimento dei muoni. Tutto quello che c'era da fare era montarlo su una qualche specie di braccio che potesse tenerlo sopra il centro del blocco. Una o due ore di lavoro. Wow! Sarebbe stata una lunga notte.

Mentre stavo consumando una rapida cena a casa, scherzando un po' con i bambini, mi telefonò Richard Garwin, un fisico dell'IBM. Garwin stava facendo ricerche sui processi atomici nei laboratori dell'IBM, che erano proprio a fianco del campus dell'università. Dick passava spesso dal nostro dipartimento, e chiamava giusto per sapere le ultime novità sull'esperimento di Wu, non essendo potuto venire al pranzo cinese.

«Ehi, Dick, ho avuto una grande idea su come controllare la violazione della parità, ed è più semplice di quanto tu possa immaginare.» Mi spiegai rapidamente e chiesi: «Perché non vieni al laboratorio e ci dai una mano?». Dick viveva lì vicino, a Scarsdale. Per le otto di sera stavamo smontando l'apparato del povero studente. Marcel vedeva la sua tesi di dottorato letteralmente fatta a pezzi! A Dick venne assegnato il compito di pensare a come far ruotare il telescopio elettronico in modo da poter determinare la distribuzione degli elettroni attorno al supposto asse di rotazione. Non era un problema facile, poiché portare a spasso il telescopio poteva alterare la distanza dai muoni e dunque la quantità di elettroni rivelati.

E fu allora che la seconda idea chiave venne a Dick Garwin. «Guarda» disse, «invece di muovere questa pesante piattaforma piena di contatori, lasciamola dove sta e facciamo girare i muoni in un magnete.» Rimasi sconvolto dalla semplicità e dall'eleganza dell'idea. Ma certo! Una particella carica ruotante è come un piccolo magnete e girerà come una ruota di compasso dentro un campo magnetico, con la differenza che le forze meccaniche che agiscono sul muone-magnete lo faranno girare ininterrottamente. L'idea era semplice e profonda.

Calcolare il valore del campo magnetico necessario per far girare i muoni di 360 gradi in un tempo ragionevole era una bazzecola. Che cos'è un tempo ragionevole per un muone? Ebbene, i muoni decadono in elettroni e neutrini con una vita media di 1,5 microsecondi, il che vuol dire che metà dei muoni hanno tirato le cuoia in 1,5 microsecondi. Se li avessimo fatti girare troppo lentamente, diciamo di un grado per microsecondo, la maggior parte dei muoni sarebbero scomparsi dopo aver ruotato di pochi gradi, e noi non avremmo potuto compararne la quantità a 0 e a 180 gradi, vale a dire, il numero di elettroni emessi dal «sopra» e dal «sotto» del muone, lo scopo dell'intero esperimento. Se avessimo accelerato a, diciamo, 1000 gradi per microsecondo applicando un potente campo magnetico, gli elettroni sarebbero passati così veloci dal rivelatore che avremmo avuto un'immagine confusa e inutilizzabile. Decidemmo che la velocità ideale sarebbe stata di 45 gradi per microsecondo.

Ottenemmo il campo magnetico richiesto con poche centinaia di giri di filo di rame attorno a un cilindro, e facendo passare una corrente di pochi ampère nel filo. Trovammo un tubo Lucite,* mandammo Marcel al magazzino per cercare il filo, tagliammo il blocco di grafite in basso, in modo che potesse venire incuneato nel cilindro, e collegammo il filo a una presa lontana (ce n'era una sul bancone della sala degli esperimenti). Con una frenetica attività notturna, tutto era pronto per mezzanotte. Avevamo fretta perché l'acceleratore veniva sempre spento alle otto del mattino del sabato per lavori routinari di manutenzione.

Per l'una di notte i contatori stavano già raccogliendo dati, registrando il numero di elettroni emessi nelle diverse direzioni. Ma attenzione, nello schema di Garwin noi non misuravamo direttamente questi angoli. Il telescopio elettronico restava fermo, mentre i muoni, o piuttosto i vettori dei loro assi di rotazione, giravano attorno a esso in un campo magnetico. In questo modo era il *tempo* d'arrivo dell'elettrone che corrispondeva alla direzione: registrando il tempo, registravamo anche la direzione. Naturalmente, c'era un mucchio di problemi. Gli operatori dell'acceleratore erano assediati da noialtri per avere il maggior numero possibile di protoni contro il bersaglio. Tutti i contatori dovevano essere calibrati. Il piccolo campo magnetico applicato ai muoni doveva essere tenuto sotto controllo.

Dopo alcune ore, vedemmo una notevole differenza nel conto degli elettroni emessi a 0 gradi e in quello degli elettroni emessi a 180 gradi, relativamente all'asse di rotazione. I dati erano molto grezzi, e non giustificavano un eccessivo ottimismo. Quando li esaminammo alle otto del mattino successivo, il nostro scetticismo venne confermato. I dati erano ora molto meno convincenti e potevano essere conformi all'ipotesi che tutte le direzioni di emissione fossero equivalenti, cioè con simmetria speculare. Implorammo gli operatori dell'acceleratore di concederci ancora quattro ore, ma non ci fu niente da fare: le regole sono regole. Scoraggiati, ridiscendemmo nella camera dell'acceleratore, dove stava il nostro marchingegno, per avere la bella sorpresa di trovare una piccola catastrofe. Il cilindro Lucite attorno al quale avevamo avvolto il filo si era curvato a causa del calore prodotto dalla corrente, e il blocco di grafite era ca-

* *Lucite* è un marchio di fabbrica che contraddistingue un particolare tipo di resina acrilica trasparente prodotta negli Stati Uniti e impiegata, tra l'altro, nell'industria aeronautica. (*NdT*)

duto in fondo. Ma allora, i muoni non stavano più dentro il campo magnetico che avevamo preparato. Dopo qualche recriminazione (sempre prendersela con lo studente!) esultammo: i dati deludenti potevano ben essere stati alterati da questo incidente.

Facemmo un piano di lavoro per il weekend. Progettare un campo magnetico migliore. Pensare a come aumentare la raccolta di dati aumentando il numero di muoni fermati e la frazione di elettroni contati. Riflettere un po' di più su ciò che succede ai muoni carichi positivamente nelle collisioni che li fermano e in quei microsecondi durante i quali stanno dentro il reticolo di atomi di carbonio. Dopotutto, se un muone positivo riesce a catturare uno dei tanti elettroni che vagano liberi nella grafite, questo elettrone potrebbe facilmente depolarizzare il muone (confondendo il suo spin), così che non tutti i muoni si comporterebbero allo stesso modo.

Tornammo a casa per dormire poche ore prima di ritrovarci alle due del pomeriggio. Lavorammo per tutto il weekend, ognuno con un compito diverso. Io provai a ricalcolare il moto del muone dal momento della sua nascita, quando è scaraventato al mondo dal suo genitore pione, fino al nostro apparato, tenendo conto della rotazione e della direzione. Postulai una violazione massima della parità, di modo che tutti i muoni avrebbero ruotato esattamente nella direzione del loro moto. Tutto indicava che se la violazione fosse stata grande, anche metà del massimo, avremmo dovuto vedere una curva oscillante. Questo non solo avrebbe provato la violazione della parità, ma ci avrebbe anche dato un valore numerico della sua grandezza, dal cento per cento a (orribile prospettiva) zero. Chiunque vi dica che gli scienziati sono esseri spassionati e freddamente obiettivi non sa quello che dice. Noi bramavamo disperatamente di vedere la parità violata. La parità non era una graziosa fanciulla e noi non eravamo dei ragazzi impazienti, ma fare una scoperta ha qualcosa di libidinoso. La cartina di tornasole dell'obiettività scientifica sta nel non lasciare che la passione influenzi la metodologia e la capacità autocritica.

Lasciando da parte il cilindro Lucite, Garwin avvolse del filo direttamente attorno a un pezzo di grafite, controllando il sistema a livelli d'energia pari a due volte quella necessaria. Marcel risistemò i contatori, migliorò l'allineamento, avvicinò il telescopio elettronico al blocco di fermata, controllò e migliorò l'efficienza di tutti i contatori, il tutto pregando con fervore che qualcosa di pubblicabile venisse fuori da questa frenetica attività.

Il lavoro incontrò degli intoppi. Il lunedì mattina, qualche voce

sulla nostra intensa attività era filtrata, giungendo all'équipe degli operatori dell'acceleratore e ad alcuni dei nostri colleghi. La squadra di manutenzione dell'acceleratore trovò dei problemi alla macchina e il lunedì essa non funzionò: niente fascio fino alle otto del mattino di martedì, nel migliore dei casi. Okay, più tempo per far fumare il cervello, per agitarsi, per controllare. Dei colleghi dell'Università della Columbia arrivarono al Nevis Lab per curiosare. Un giovane intelligentone, che era stato presente al pranzo cinese, fece qualche domanda e, dalle mie reticenti risposte, dedusse che stavamo tentando un esperimento sulla parità.

«Non funzionerà mai» mi assicurò. «I muoni si depolarizzeranno una volta persa energia nel filtro di grafite.» Io mi deprimevo facilmente ma non mi scoraggiavo. Ricordavo il mio mentore, il grande saggio dell'Università della Columbia I.I. Rabi, che diceva: «Lo spin è una cosa molto scivolosa».

Alle sei circa del pomeriggio di lunedì la macchina cominciò a dare segni di vita, in anticipo sul previsto. Affrettammo i nostri preparativi, ricontrollando tutti gli apparati. Notai che il bersaglio con il suo elegante involucro di fili di rame, posto su un ripiano alto dieci centimetri, era un po' basso. Un'occhiata al microscopio mi convinse che dovevo trovare qualcosa che lo alzasse di un paio di centimetri o giù di lì. In un angolo vidi un barattolo di caffè marca Maxwell House pieno in parte di viti da legno e lo sostituii al ripiano. Perfetto! (Quando l'Istituto Smithsoniano chiese in seguito il barattolo per poter replicare l'esperimento, non riuscimmo più a trovarlo.)

L'altoparlante annunciò che la macchina stava per essere messa in funzione e che tutto il personale doveva lasciare la sala dell'acceleratore (se non voleva finire fritto). Ci affrettammo per la ripida scala d'acciaio e attraverso il parcheggio verso l'edificio del laboratorio, dove i cavi provenienti dai rivelatori erano collegati con quadri elettronici contenenti circuiti, contatori, oscilloscopi. Garwin era andato a casa alcune ore prima, e io mandai Marcel a mangiare qualcosa, mentre cominciavo una procedura di controllo sui segnali elettronici provenienti dai rivelatori. Uno spesso quadernone veniva usato per annotare le informazioni rilevanti. Era gaiamente decorato con vari graffiti – «Oh, merda!», «Chi diavolo si è dimenticato di girare la caffettiera?», «Ha chiamato tua moglie» – così come di utili elenchi di cose da fare, cose fatte, condizioni dei circuiti («Occhio al contatore numero 3. Tende a fare scintille e a perdere il conto»).

Per le sette e un quarto l'intensità dei protoni era prossima allo standard e il bersaglio che produce pioni venne messo in posizione da un controllo a distanza. Istantaneamente i contatori cominciarono a registrare particelle in arrivo. Io guardavo alla fila cruciale di contatori, quelli che avrebbero registrato il numero di elettroni emessi a diversi intervalli dopo che i muoni stessi si fossero fermati. I numeri erano ancora molto piccoli: 6, 8, 13...

Garwin arrivò alle nove e mezzo. Io decisi di andare a casa a dormire un poco e di dargli il cambio alle sei del mattino successivo. Guidai verso casa molto lentamente. Ero stato in piedi venti ore filate ed ero troppo stanco per mangiare. Mi sembrava di essermi appena addormentato quando squillò il telefono. Erano le tre del mattino. Era Garwin. «Vieni subito. È fatta!»

Alle tre e venticinque parcheggiavo al laboratorio e mi precipitai dentro. Garwin aveva incollato le strisciate che uscivano dai contatori nel quadernone. I numeri erano assolutamente convincenti. A 0 gradi venivano emessi elettroni in quantità più che doppia che a 180 gradi. La natura poteva fare differenza fra una rotazione destrorsa e una sinistrorsa. Per quel momento la macchina aveva raggiunto la massima potenza, e le registrazioni dei contatori cambiavano rapidamente. Quello corrispondente a 0 gradi dava come lettura 2560, quello corrispondente a 180 gradi, 1222. Era una differenza assolutamente significativa dal punto di vista statistico. I contatori nelle posizioni intermedie sembravano dare anch'essi numeri soddisfacentemente intermedi. Le implicazioni di una violazione della parità a questo livello erano così grandi che... guardai Dick. Cominciavo a respirare a fatica, le mie mani erano madide di sudore, i miei battiti erano accelerati, ero in un delirio che comprendeva molti (non tutti!) sintomi di un orgasmo. Ragazzi, quella era una cosa grossa. Cominciai a fare un elenco di cose da controllare: quali fattori potevano comportarsi in modo tale da simulare il risultato che stavamo osservando? C'erano tante possibilità. Per esempio, impiegammo un'ora a controllare i circuiti usati per contare gli elettroni. Tutto in ordine. In che altro modo potevamo controllare le nostre conclusioni?

Martedì, quattro e mezzo del mattino. Chiedemmo all'operatore di fermare il fascio. Corremmo giù e ruotammo il telescopio elettronico di 90 gradi. Se sapevamo quello che stavamo facendo, il modello di riferimento avrebbe dovuto spostarsi di un intervallo temporale corrispondente a 90 gradi. Tombola! Si spostava come avevamo previsto.

Alle sei sollevai il telefono e chiamai T.D. Lee. Egli rispose dopo un solo squillo. «T.D., abbiamo guardato la catena pi-mu-e e abbiamo un segnale a venti deviazioni standard. La legge della parità è

spacciata.» T.D. cominciò a fare domande con la velocità di un mitra: «Che energia gli elettroni? Come varia la simmetria con l'energia degli elettroni? Il muone ruota parallelo alla direzione d'arrivo?». Per alcune di esse avevamo la risposta. Per altre, arrivò durante la giornata. Garwin cominciò a disegnare grafici inserendovi le letture dei contatori. Io compilai un'altra lista di cose da fare. Alle sette cominciarono ad arrivare le telefonate dei colleghi dell'università che avevano saputo. Garwin scomparve alle otto e arrivò Marcel (temporaneamente dimenticato!). Per le nove la stanza era affollata di colleghi, tecnici, segretarie che cercavano di scoprire che cosa stesse succedendo.

Fu dura continuare l'esperimento. Ritornarono i miei sintomi orgasmici. Eravamo i depositari di nuove e profonde informazioni sul mondo. La fisica era cambiata. E la violazione della parità ci aveva dato un nuovo e potente strumento: muoni polarizzati che erano sensibili ai campi magnetici e avevano spin identificabili grazie agli elettroni prodotti dal loro decadimento.

Telefonate da Chicago, dalla California, dall'Europa arrivarono nelle tre o quattro ore successive. Coloro che avevano degli acceleratori di particelle, a Chicago come a Berkeley, a Liverpool come a Ginevra o a Mosca, corsero alle loro macchine come piloti da caccia ai loro aerei quando suona l'allarme. Noi continuammo l'esperimento e continuammo a controllare le nostre assunzioni per un'intera settimana, anche se non vedevamo l'ora di pubblicare i risultati. Raccogliemmo dati, in una forma o nell'altra, nei sei mesi successivi, per ventiquattr'ore al giorno, per sei giorni alla settimana. I dati si accumulavano. Altri laboratori confermarono i nostri risultati.

C.S. Wu, come è comprensibile, non fece salti di gioia per il nostro chiaro e inequivocabile risultato. Noi volevamo firmare l'articolo con lei, ma insistette, e vada a suo sempiterno merito, che aveva bisogno ancora di una settimana per controllare i suoi risultati.

È difficile far capire il rumore che provocarono i risultati di questo esperimento nella comunità dei fisici. Noi avevamo messo sotto accusa – a dire il vero, distrutta – una consolidata credenza, che la natura esibisca la simmetria speculare. Negli anni seguenti, come vedremo, altre simmetrie vennero confutate. Eppure l'esperimento sconvolse molti teorici, fra i quali Wolfgang Pauli, che pronunciò la famosa frase: «Non posso credere che Dio sia debolmente mancino». Egli non voleva dire che l'Onnipotente dovesse privilegiare l'uso della destra, ma che avrebbe dovuto essere ambidestra.

La riunione annuale della Società americana di fisica radunò una

folla di 2000 studiosi nel salone da ballo dell'Hotel Paramount a New York, il 6 febbraio 1957. La gente penzolava dal soffitto, aggrappata ai travetti. Il risultato era annunciato da tutti i principali giornali in prima pagina. Il «New York Times» pubblicò integralmente la nostra comunicazione alla stampa, con illustrazioni di particelle e di specchi. Ma nulla di tutto questo poteva essere paragonato alla sensazione di mistica euforia provata da due fisici nella loro solitudine di fronte a una nuova e profonda verità, alle tre del mattino.

VII

A-tomo!

Ieri tre scienziati hanno vinto il premio Nobel per avere scoperto il più piccolo oggetto dell'universo. È venuto fuori che è la bistecca che servono da Denny's.

JAY LENO

Gli anni Cinquanta e Sessanta furono davvero grandi per la scienza americana. In confronto agli anni Novanta, molto più duri, sembra retrospettivamente che nei Cinquanta chiunque avesse una buona idea e molta determinazione potesse farsi finanziare per il suo progetto. Come criterio della buona salute della scienza, forse questo non è inferiore a nessun altro; e la nazione ricava ancora dei benefici dal lavoro scientifico di quei due decenni.

L'alluvione di strutture subnucleari scatenata dagli acceleratori di particelle era altrettanto sorprendente degli oggetti celesti rivelati dal telescopio di Galileo. Il genere umano acquisì, come nella rivoluzione galileiana, una conoscenza del mondo nuova e fino ad allora insospettata; e il fatto che questa conoscenza riguardasse lo spazio interno anziché quello esterno non la rendeva meno profonda. Fu un evento paragonabile alla scoperta dei microbi e dell'invisibile universo biologico dei microorganismi da parte di Pasteur. La bizzarra congettura del nostro eroe Democrito («Congettura?!» lo sento che strilla. «Congettura?!?!») non era nemmeno più oggetto di discussione; non c'era più da dibattere se esistesse una particella talmente piccola da sfuggire all'occhio umano. La ricerca della particella minima richiedeva, chiaramente, delle estensioni dell'occhio: gli occhiali, i microscopi e adesso gli acceleratori di particelle, che zoomavano avvicinandosi sempre più alle tracce del vero a-tomo. Quelli che vedevamo, ora, erano gli adroni, un mucchio di adroni, le particelle indicate con lettere greche che nascono dalle violente collisioni prodotte dai fasci degli acceleratori.

Con questo non voglio dire che la proliferazione degli adroni fosse tutta rose e fiori. Favoriva il pieno impiego, questo è vero; diffondeva la prosperità, tanto che a un certo punto gli scopritori di nuove

particelle non formavano più un circolo esclusivo. Vuoi trovare un adrone nuovo di zecca? Aspetta il prossimo acceleratore. Nel 1986 Paul Dirac, durante una conferenza sulla storia della fisica al Fermilab, raccontò quanto fosse stato difficile per lui accettare una certa conseguenza delle sue equazioni: l'esistenza di una nuova particella, il positrone, scoperta poi da Carl Anderson pochi anni dopo. Nel 1927 pensare in modo così rivoluzionario era contro l'etica della fisica. Quando Victor Weisskopf, dalla platea, osservò che Einstein aveva ipotizzato l'esistenza di un elettrone positivo fin dal 1922, Dirac liquidò la cosa con un cenno della mano: «Solo fortuna». Nel 1930 Wolfgang Pauli passò le pene dell'inferno prima di decidersi a postulare l'esistenza del neutrino, e alla fine accettò questa particella con grande riluttanza e solo come male minore, visto che era in gioco nientemeno che il principio di conservazione dell'energia: o il neutrino esisteva o si doveva rinunciare a questa conservazione. Ma il conservatorismo nei confronti dell'introduzione di nuove particelle non è durato; come dice il professor Bob Dylan, «Stanno cambiando i tempi, ah». Il pioniere di questa nuova filosofia è stato il teorico Hideki Yukawa, che ha inaugurato la libera postulazione di nuove particelle per spiegare fenomeni nuovi.

Negli anni Cinquanta e nei primi anni Sessanta i teorici avevano molto da fare, impegnati a classificare centinaia e centinaia di adroni, cercare uno schema e un significato in questo nuovo strato della materia e perseguitare i colleghi sperimentali perché fornissero loro altri dati. Le centinaia di adroni erano eccitanti, ma erano anche un mal di capo: dov'era la semplicità che cercavamo fin dai tempi di Talete, Empedocle e Democrito? Lo zoo di queste entità era intrattabile, e si cominciava a temere che le loro legioni fossero infinite.

In questo capitolo vedremo come si sia realizzato, finalmente, il sogno di Democrito, Boscovich e altri. Faremo la cronaca della costruzione del modello standard, che comprende le particelle elementari indispensabili per formare tutta la materia dell'universo, passata e presente, più le forze che agiscono su queste particelle. Per certi aspetti il modello standard è più complesso di quello di Democrito, nel quale ogni tipo di materia aveva un a-tomo indivisibile tutto suo e gli a-tomi si univano grazie alla complementarità delle loro forme. Nel modello standard le particelle materiali sono tenute insieme da tre interazioni diverse, ciascuna delle quali è trasportata da altre particelle ancora; tutte queste particelle interagiscono fra loro in una sorta di danza molto intricata che possiamo descrivere matematicamente, ma non visualizzare. Per certi aspetti, tuttavia, questo mo-

dello è più semplice di quanto Democrito avrebbe mai potuto immaginare: non abbiamo bisogno di un tipo di a-tomo a parte per la *feta*, di uno per i cavolini di Bruxelles e di uno per i broccoli. C'è solo un piccolo numero di a-tomi, e combinandoli in vari modi si può fare *tutto*. Conosciamo già tre di queste particelle elementari, l'elettrone, il muone e il neutrino; presto conosceremo anche le altre e vedremo come tutte si armonizzano in uno schema coerente.

Questo è un capitolo trionfale, perché la nostra ricerca del mattone di base arriva al capolinea; ma negli anni Cinquanta, e nei primi anni Sessanta, non eravamo così ottimisti circa la possibilità di trovare la risposta finale all'enigma di Democrito. Il mal di capo delle centinaia di adroni rendeva piuttosto fievole la speranza di individuare un piccolo numero di particelle elementari. Progrediva molto meglio, invece, l'identificazione delle interazioni naturali. Se ne riconoscevano chiaramente quattro: la gravità, l'interazione elettromagnetica, l'interazione forte e quella debole. La gravità era dominio degli astrofisici perché troppo debole per essere studiata in laboratorio con gli acceleratori, e con il tempo questa lacuna avrebbe finito per ossessionarci; ma stavamo mettendo le altre tre interazioni sotto controllo.

L'interazione elettrica

Gli anni Quaranta avevano visto il trionfo di una teoria quantistica dell'interazione elettromagnetica. Nel 1927 Paul Dirac era riuscito a fondere la meccanica quantistica e la relatività ristretta nella sua teoria dell'elettrone; tuttavia, quello fra la teoria quantistica e l'elettromagnetismo, o interazione elettromagnetica, era un matrimonio tempestoso, pieno di problemi intrattabili.

La lotta per unificare le due teorie era nota, ufficiosamente, come «guerra contro le infinità». A metà degli anni Quaranta erano implicati in questa guerra le infinità da una parte e molti dei principali luminari della fisica dall'altra, Pauli, Weisskopf, Heisenberg, Hans Bethe, Dirac e qualche nuovo astro in ascesa, come Richard Feynman a Cornell, Julian Schwinger a Harvard, Freeman Dyson a Princeton e Sin-Itiro Tomonaga in Giappone. Le infinità, in parole povere, venivano da questo fatto: quando si calcolava il valore di certe proprietà dell'elettrone, la risposta, stando alle nuove teorie quantistiche relativistiche, era «infinito». Non un valore molto alto, ma proprio *infinito*.

Possiamo visualizzare la quantità matematica detta infinito pensando alla totalità degli interi e poi aggiungendone un altro (ce n'è sempre uno in più). Oppure – e questo è un modo che aveva maggiori probabilità di figurare nei calcoli dei brillanti ma infelicissimi teorici appena citati – possiamo cercare il valore di una frazione il cui denominatore diventi zero: la maggior parte delle calcolatrici tascabili vi informerà cortesemente (di solito con una successione di E: EEEEEE...) che avete fatto qualcosa di stupido. Le vecchie calcolatrici meccaniche a relè si perdevano invece in una straziante cacofonia, che di solito terminava con uno sbuffo di fumo nerastro. Per i teorici le infinità erano il segno di un qualche errore molto profondo nel modo in cui veniva consumato il matrimonio fra elettromagnetismo e teoria quantistica, ma probabilmente è meglio lasciar cadere questa metafora, per quanto tentatrice. Comunque sia, nei tardi anni Quaranta Feynman, Schwinger e Tomonaga, lavorando ciascuno per conto proprio, ottennero qualcosa di simile a una vittoria, superando finalmente l'impossibilità di calcolare le proprietà di particelle cariche come l'elettrone.

Questo balzo in avanti della teoria fu fortemente stimolato da un esperimento eseguito all'Università della Columbia da uno dei miei maestri, Willis Lamb, che nei primi anni dopo la guerra teneva la maggior parte dei corsi avanzati e lavorava sulla teoria elettromagnetica. Lamb progettò ed eseguì, usando la tecnologia radaristica sviluppata proprio all'università durante la guerra, un esperimento, splendido per precisione, sulle proprietà di determinati livelli energetici opportunamente scelti dell'atomo di idrogeno. I suoi dati sarebbero serviti a controllare certi aspetti particolarmente sottili della teoria elettromagnetica quantistica, nuova di zecca, che fu motivata proprio dal suo esperimento. Ometterò i particolari di quest'ultimo; ma vorrei sottolineare che il seme dell'entusiasmante creazione di una teoria dell'interazione elettrica effettivamente utilizzabile fu fornito da un esperimento.

La cosa che i teorici tirarono fuori ha preso il nome di «elettrodinamica quantistica rinormalizzata». L'elettrodinamica quantistica (*Quantum Electrodynamics*, QED) permetteva ai teorici di calcolare le proprietà dell'elettrone e del suo fratello pesante, il muone, fino alla decima cifra dopo la virgola.

La QED era una teoria del campo e quindi ci dava un'immagine fisica di come si trasmette una forza fra due particelle di materia, per esempio fra due elettroni. Newton e Maxwell avevano avuto dei problemi con l'idea di azione a distanza. Qual è il meccanismo? Uno di quegli antichi così intelligenti – sicuramente un compare di De-

mocrito – scoprì l'influenza della Luna sulle maree terrestri e andò in paranoia sul problema di come quell'influenza potesse manifestarsi attraverso il vuoto che c'era in mezzo. Nella QED il campo è quantizzato, cioè sminuzzato in quanti: altre particelle, che tuttavia non sono particelle di materia ma particelle *del campo* e trasmettono l'interazione viaggiando, alla velocità della luce, fra le due particelle materiali che interagiscono. Sono particelle messaggere: nella QED il loro nome è fotoni. Anche le altre interazioni hanno i propri messaggeri e anzi queste particelle sono il nostro modo di visualizzarle.

Particelle virtuali

Prima di andare avanti devo spiegare che le particelle hanno due tipi di manifestazione, reale e virtuale. Le particelle reali possono andare dal punto A al punto B, conservano l'energia, fanno ticchettare i contatori Geiger; le particelle virtuali, come ho già accennato nel capitolo VI, non fanno nessuna di queste cose. Le particelle messaggere, o vettori delle interazioni, possono essere reali ma si presentano più spesso come particelle virtuali, perciò i due termini spesso sono sinonimi. Sono queste particelle virtuali a trasportare il messaggio interattivo da particella a particella (materiale); ma se è disponibile energia in abbondanza un elettrone può emettere un fotone reale che farà realmente ticchettare un reale contatore Geiger. Una particella virtuale è un costrutto concettuale nato dalla permissività della fisica quantistica, le cui leggi ammettono che una particella possa essere creata prendendo a nolo l'energia necessaria. La durata di questo prestito è governata dalle regole di Heisenberg, in base alle quali il prodotto dell'energia noleggiata per la durata del prestito deve essere maggiore della costante di Planck divisa per 2π. L'equazione, insomma, dice che $\Delta E \Delta t$ è maggiore di $h/2\pi$; questo significa che maggiore è l'energia presa a prestito, minore è il tempo in cui la particella virtuale può esistere e fruirne.

Per questa concezione il cosiddetto spazio vuoto può anche essere inondato da questi oggetti spettrali: fotoni virtuali, elettroni, positroni, quark e antiquark virtuali, perfino (con una probabilità, ahimè, piccolissima) palle da golf e da antigolf virtuali. In un simile vuoto dinamico e vorticoso le proprietà di una particella reale cambiano; i cambiamenti, per buona sorte della salute mentale e del progresso, sono minimi, ma sono anche misurabili, e una volta che l'abbiamo capito la nostra vita è diventata una lotta fra misurazioni sempre più precise e calcoli teorici sempre più pazienti e definiti. Prendiamo, per esempio,

un elettrone reale: intorno a esso, e a causa della sua esistenza, c'è una nube di effimeri fotoni virtuali che segnalano chiaramente la presenza di un elettrone, ma influenzano anche le sue proprietà. Per di più un fotone virtuale può dissolversi formando, per brevissimo tempo, una coppia $e^+ e^-$ (positrone ed elettrone), che in un batter d'occhio di moscerino tornerà a essere fotone; ma anche questa trasformazione così evanescente influenza le proprietà del nostro elettrone.

Nel capitolo V ho dato il valore g dell'elettrone, secondo i calcoli teorici della QED e secondo le misurazioni di esperimenti ben congegnati; si ricorderà che le due cifre coincidevano fino all'undicesimo decimale. Con il valore g del muone abbiamo avuto altrettanto successo; e il muone, essendo più pesante dell'elettrone, permette un controllo ancora più incisivo del concetto di particella messaggera: i suoi messaggeri possono avere un'energia più elevata e combinare più guai, con la conseguenza che il campo influenza le proprietà del muone ancora più intensamente. Sono cose molto astratte, ma la concordanza fra teoria ed esperimento è sensazionale e dimostra la potenza della teoria stessa.

Il magnetismo personale del muone

Quanto all'esperimento di verifica... Il mio primo anno sabbatico (1958-59) andai al CERN di Ginevra usando una borsa di studio Ford e una Guggenheim per integrare il mio mezzo stipendio. Il CERN era stato creato da un consorzio di dodici nazioni europee per costruire e utilizzare in comune le costose attrezzature richieste dalla fisica delle alte energie. Fondata nei tardi anni Quaranta, quando le ceneri della seconda guerra mondiale erano ancora calde, questa impresa cooperativa fra ex nemici in guerra è diventata un modello di collaborazione scientifica internazionale. Il direttore della ricerca era il mio vecchio patrono e amico Gilberto Bernardini. Io ero andato fin lì soprattutto per vedere l'Europa, imparare a sciare e curiosare nel nuovo laboratorio, annidato lungo il confine franco-svizzero poco fuori Ginevra, ma nei venti anni successivi ne avrò passati almeno quattro a fare ricerca in questa splendida istituzione multilingue. Francese, inglese, italiano e tedesco erano molto usati, ma la lingua ufficiale del CERN era il Fortran (parlato male);* funzionavano anche i grugniti e il linguaggio ge-

* *Fortran* è la sigla inglese di *For(mula) Tran(slation)*, vale a dire «(linguaggio per la) traduzione di formule». Si tratta di un linguaggio realizzato per la programmazione degli elaboratori elettronici, destinato ad applicazioni tecnico-scientifiche. (*NdT*)

stuale. Un tempo per paragonare il CERN e il Fermilab dicevo che «il CERN è splendore gastronomico e catastrofe architettonica, il Fermilab è l'esatto opposto»; poi ho convinto Bob Wilson ad assumere Gabriel Tortella, il leggendario chef e direttore della mensa del CERN, come consulente del Fermilab. Il CERN e il Fermilab sono quel che si dice dei rivali collaborativi: amano odiarsi a vicenda.

Al CERN organizzai, con la collaborazione di Gilberto, un esperimento «g meno 2» destinato a misurare – con l'aiuto di alcuni stratagemmi – il fattore g del muone con precisione mozzafiato. Uno di questi stratagemmi era reso possibile dal fatto che i muoni escono polarizzati dal decadimento del pione; la grande maggioranza, cioè ha uno spin che punta nella stessa direzione rispetto al senso del moto. Un altro trucco, molto astuto, è implicito nel nome dell'esperimento, «gi meno due» o, come dicono i francesi, «ge moins deux». Il valore g ha a che fare con la potenza del piccolo magnete costituito da ogni particella dotata di carica e spin, come il muone e l'elettrone.

Ricordiamo che la teoria «grezza» di Dirac prevedeva che g valesse esattamente 2, ma all'evolversi della QED emerse che erano indispensabili delle correzioni, piccole ma importanti, di questo valore, dovute al fatto che il muone (o l'elettrone) «sente» le pulsazioni quantiche del campo circostante. Abbiamo già visto che una particella carica può emettere un fotone messaggero e che questo si può dissolvere virtualmente (per brevissimo tempo) formando una coppia di particelle con carica opposta, per poi ricostituirsi prima che il processo diventi visibile; l'elettrone, isolato nel vuoto, è perturbato dal fotone virtuale, influenzato dalla coppia virtuale e sottoposto a torsione da parte dell'effimero campo magnetico. Questi e altri processi (ancora più sottili) presenti nella brodaglia ribollente dei fatti virtuali collegano, per quanto debolmente, l'elettrone a tutte le particelle cariche esistenti, e le proprietà dell'elettrone stesso ne sono modificate. Nel fantasioso linguaggio della fisica teorica, l'elettrone «nudo» è un oggetto immaginario isolato dall'influenza del campo mentre l'elettrone «vestito» porta su di sé l'impronta dell'universo, interamente consegnata ad alcune minuscole variazioni delle sue proprietà nude.

Nel capitolo V ho parlato del fattore g dell'elettrone; ma i teorici erano ancor più interessati al muone, che, avendo una massa duecento volte superiore, può emettere dei fotoni virtuali che arrivano più lontano, fino ai processi più insoliti. Il fattore g del muone

$$g = 2(1{,}001165918)$$

è il risultato (1987) di molti anni di lavoro di uno di questi teorici e rappresenta il culmine di una lunga serie di calcoli che hanno usato le nuove formulazioni della QED dovute a Feynman e altri. I termini che, sommati, danno il valore di 0,001165918 sono noti come correzioni radiative. Una volta, all'Università della Columbia, mentre ascoltavamo una conferenza di Abraham Pais sulle correzioni radiative, entrò un bidello con una chiave inglese; Pais si girò verso di lui, per chiedergli che cosa voleva, e dal pubblico qualcuno disse: «Bram, credo che sia venuto ad aggiustare il termosifone».*

Come confrontare la teoria con l'esperimento? Il trucco stava nel trovare un modo di misurare la *differenza* fra il valore g del muone e 2. Se riusciamo a farlo, possiamo misurare la correzione (0,001165918) *direttamente*, e non come piccola aggiunta a un numero molto più grande. Immaginate di pesare una monetina pesando prima una persona che ce l'ha addosso, e poi quella stessa persona senza la moneta: non è meglio pesare direttamente quest'ultima? Ora, supponiamo di intrappolare un muone in un'orbita dentro un campo magnetico: anche la carica orbitante è un «magnete», con un valore g che secondo la teoria di Maxwell è esattamente 2, mentre il magnete dovuto allo spin ha un piccolissimo eccesso rispetto a tale valore. Il muone, dunque, possiede due «magneti» diversi, uno interno (lo spin) e l'altro esterno (l'orbita). Se misuriamo il magnete dello spin mentre il muone è in questa configurazione orbitale, gli sottraiamo 2 e questo ci permette di misurare direttamente la deviazione da 2, per quanto piccola, del muone.

Immaginate una piccola freccia (l'asse di rotazione del muone) che percorre una grande circonferenza restando sempre tangenziale all'orbita: è quello che accadrebbe se g fosse esattamente 2. Per quante fossero le orbite percorse dalla particella, la freccetta dello spin resterebbe sempre tangenziale. Ma se esiste una differenza, per quanto piccola, fra il vero valore di g e 2, la freccetta si allontanerà dal punto di tangenza, magari di una frazione di grado per orbita, e dopo, poniamo, 250 passaggi potrebbe puntare verso il centro, come un raggio; e continuando il moto orbitale, dopo 1000 orbite avrà fatto un giro completo (360 gradi) rispetto alla direzione tangenziale iniziale. Ora, grazie alla violazione della parità possiamo scoprire (trionfalmente) la direzione della freccia (lo spin del muone) osservando quella in cui partono gli elettroni quando il muone decade; e l'angolo, quale che sia, fra l'asse dello spin e la tangente all'orbita rappresenta una differenza fra g e 2. Una misurazione precisa di

* *Radiator* in inglese. (*NdT*)

questo angolo ci dà la misura precisa della *differenza*. Capito? No? Allora abbiate fede!

L'esperimento che avevo proposto era complicato e ambizioso, ma nel 1958 era facile trovare giovani fisici molto dotati e disposti a collaborare. Tornai negli Stati Uniti a metà del 1959, rivisitando periodicamente l'esperimento europeo. Attraversò diverse fasi, ognuna delle quali dava indicazioni per la successiva, e terminò veramente solo nel 1978, quando fu pubblicato il valore g definitivo del muone secondo il CERN, un trionfo dell'ingegnosità sperimentale e dell'ostinazione (i tedeschi la chiamano *Sitzfleisch).** Il valore g dell'elettrone era più preciso, ma non si deve dimenticare che gli elettroni sono eterni mentre i muoni stanno al mondo per due soli milionesimi di secondo. Il risultato?

$$g = 2(1{,}001165923 \pm 0{,}00000008)$$

L'errore di otto parti su cento milioni è chiaramente compatibile con la previsione teorica.

Ho detto tutto ciò per far capire che la QED è una grande teoria e che Feynman, Schwinger e Tomonaga sono considerati dei grandi fisici anche grazie a essa. Ha però alcune sacche di mistero, e una di queste è degna di nota e pertinente al nostro tema: si tratta delle infinità, come per esempio la massa dell'elettrone. I primi tentativi di teoria quantistica dei campi calcolarono una massa infinita per un elettrone puntiforme. È come se Babbo Natale, fabbricando elettroni da immettere nel mondo, dovesse condensare una certa quantità d'elettricità negativa in un volume piccolissimo. Un lavoraccio! Lo sforzo si manifesterebbe come massa, una massa enorme, ma l'elettrone, che entra in scena a 0,511 MeV, cioè circa 10^{-30} chilogrammi, è un peso leggero, ha la massa più piccola fra tutte le particelle con una massa chiaramente non nulla.

Feynman e i suoi colleghi hanno proposto di aggirare il problema di queste temute infinità inserendo nelle equazioni, ogni volta che esse compaiono, la massa (conosciuta) dell'elettrone. Nel mondo reale una cosa del genere si potrebbe chiamare imbroglio; nel mondo della teoria si chiama «rinormalizzazione», un metodo, matematicamente coerente, per dribblare quelle imbarazzanti infinità che nessuna vera teoria vorrebbe contenere. Ma niente paura: la faccenda ha funzionato; e ha permesso quei calcoli superprecisi di cui abbiamo parlato. Così il problema della massa è stato aggirato (ma non risolto), e ce lo portiamo dietro come una bomba a orologeria che ticchetta piano piano, aspettando di essere attivata dalla particella di Dio.

* L'espressione tedesca equivale alla nostra «aver messo le radici», nel senso di avere costanza, perseveranza. (*NdT*)

L'interazione debole

Uno dei misteri che ossessionavano Rutherford e altri era la faccenda della radioattività. Com'è che i nuclei e le particelle decadono, volente o nolente, in altre particelle? Il primo fisico a chiarire questo problema con una teoria esplicita fu, negli anni Trenta, Enrico Fermi.

Ci sono storie in quantità sull'intelligenza di Fermi. Durante il primo test nucleare di Alamogordo, nel Nuovo Messico, si stese a terra a circa quindici chilometri dal traliccio della bomba; dopo l'esplosione si alzò e cominciò a lasciar cadere dei pezzettini di carta. Da principio questi, nell'aria ferma, gli cadevano ai piedi, ma dopo pochi secondi arrivò l'onda di pressione che li buttò qualche centimetro più in là; Fermi calcolò la potenza dell'esplosione dallo spostamento dei pezzettini di carta, e questo risultato ottenuto sul posto si rivelò in stretto accordo con la misurazione ufficiale, il cui calcolo richiese diversi giorni. (Tuttavia un amico, il fisico italiano Emilio Segrè, ha osservato che anche Fermi era umano. Aveva dei problemi a preparare la sua nota spese presso l'Università di Chicago.)

Fermi, come molti fisici, amava i giochi matematici. Alan Wattenberg ha raccontato che una volta, mentre pranzava con un gruppo di colleghi, lo scienziato notò che le finestre erano sporche e sfidò tutti a calcolare lo spessore che la sporcizia poteva raggiungere prima di cadere dai vetri a causa del proprio peso, dopodiché li aiutò a completare l'esercizio. Bisognava partire dalle costanti fondamentali della natura, applicare l'interazione elettromagnetica e calcolare le attrazioni dielettriche che fanno aderire l'uno all'altro i corpi isolanti. Un giorno a Los Alamos, ai tempi del progetto Manhattan, un fisico investì un coyote con la sua macchina; Fermi dichiarò che era possibile calcolare il numero complessivo dei coyote in tutto il deserto prendendo nota delle interazioni veicolo-coyote, che erano, disse, proprio come le collisioni fra particelle. Pochi eventi, molto rari, permettevano di raggiungere delle conclusioni sulla popolazione complessiva di quelle particelle.

Era veramente in gamba, e ha avuto un sacco di riconoscimenti. Ci sono più cose con il suo nome che con quello di qualsiasi altra persona a me nota. Vediamo un po': c'è il Fermilab, c'è l'Istituto En-

rico Fermi, ci sono i fermioni (cioè tutti i quark e i leptoni), c'è la statistica di Fermi (come non detto) e c'è il fermi, un'unità di misura uguale a 10^{-13} centimetri. La mia fantasia più sfrenata è quella di lasciare dietro di me una cosa, una sola, che porti il mio nome. Ho chiesto a T.D. Lee, mio collega all'Università della Columbia, di ipotizzare una nuova particella che, una volta scoperta, possa essere chiamata Lee-one; ma è stato inutile.

Ma al di là della costruzione del primo reattore nucleare nei sotterranei dello stadio di football dell'Università di Chicago, o degli studi pionieristici sui coyote spiaccicati, Fermi ha dato un contributo che ha un ruolo centrale nella comprensione dell'universo: ha descritto una nuova interazione naturale, quella debole.

Torniamo un momento a Becquerel e Rutherford. Si ricorderà che Becquerel aveva fortunosamente scoperto la radioattività nel 1896, quando aveva riposto dell'uranio nello stesso cassetto in cui teneva le lastre fotografiche. Quando trovò queste lastre tutte annerite, ne attribuì (alla fine) la causa a dei raggi invisibili emessi dall'uranio. Dopo la scoperta della radioattività, e dopo che Rutherford ebbe distinto le radiazioni alfa, beta e gamma, numerosi fisici si concentrarono, in tutto il mondo, sullo studio delle particelle beta, che vennero rapidamente identificate con gli elettroni.

Da dove venivano questi elettroni? I fisici conclusero immediatamente che era il nucleo a emetterli, quando cambiava spontaneamente di stato. Negli anni Trenta i ricercatori stabilirono che i nuclei sono formati da protoni e neutroni e attribuirono la radioattività all'instabilità di questi loro elementi costitutivi. Naturalmente, non tutti i nuclei sono radioattivi; la conservazione dell'energia e l'interazione debole hanno un ruolo decisivo nello stabilire se e con quale frequenza un neutrone nucleare decadrà.

Negli anni Venti si fecero delle accurate misurazioni di nuclei radioattivi, prima e dopo il decadimento; si misuravano cioè la massa del nucleo iniziale, quella del nucleo finale e (tenendo presente che $E = mc^2$) quella dell'elettrone emesso. Venne fuori una cosa importante: i conti non tornavano. Mancava dell'energia, i dati in entrata superavano quelli in uscita. E Wolfgang Pauli fece l'ipotesi, ardita per quei tempi, che l'energia mancante fosse trasportata lontano da un piccolo oggetto neutro.

Nel 1933 Enrico Fermi mise insieme i pezzi del rompicapo. Gli elettroni venivano dal nucleo, ma non direttamente; un neutrone nucleare decadeva in un protone, un elettrone e un piccolo oggetto neutro – quello inventato da Pauli – che egli chiamò *neutrino* (che significa appunto «piccolo elemento neutro»). Questa reazione nucleare era dovuta, disse Fermi, a una particolare interazione che chiamò debole: e in effetti è debolissima in confronto all'interazione nucleare forte e all'elettromagnetismo. Alle basse energie, per esempio, l'interazione debole ha un'intensità che è circa un millesimo di quella dell'elettromagnetismo.

Negli anni Trenta il neutrino, essendo privo di carica e quasi privo di massa, non poteva essere osservato direttamente, e anche oggi possiamo osservarlo solo con molta fatica; ma sebbene la sua esistenza sia stata provata sperimentalmente solo negli anni Cinquanta, la maggioranza dei fisici l'accettò come una realtà di fatto perché *bisognava* che esistesse, se i conti dovevano tornare. Anche oggi, nelle reazioni più arcane dei nostri acceleratori, nelle quali sono in gioco quark e altre entità bizzarre, noi assumiamo che l'energia mancante, se ce n'è, voli via sotto forma di tali inosservabili neutrini, piccoli furbacchioni inafferrabili che lasciano la loro invisibile firma su tutto l'universo.

Ma torniamo all'interazione debole. Il decadimento descritto da Fermi – un neutrone che dà un protone, un elettrone e un neutrino (anzi, un antineutrino, per l'esattezza) – è di ordinaria amministrazione nei neutroni liberi, mentre quando un neutrone è imprigionato in un nucleo può avere luogo solo in circostanze molto particolari. Il protone libero, viceversa, non può decadere (per quanto ne sappiamo); ma all'interno del nucleo può dare origine a un neutrone, un positrone e un neutrino. Il motivo per cui il neutrone libero è soggetto al decadimento debole è la pura e semplice conservazione dell'energia: quando si trasforma in protone, essendo più pesante di quest'ultimo, ha un eccesso d'energia di massa a riposo sufficiente a creare un elettrone e un antineutrino e a spedirli via con una certa energia. Un protone libero ha troppo poca massa per questo processo; ma dentro il nucleo la presenza di tutte le particelle compagne altera, di fatto, la massa della particella legata; e se i protoni e neutroni nucleari, decadendo, possono aumentare la stabilità del nucleo in cui sono impiantati e diminuirne la massa, decadranno. Il nucleo è stabile, e non succede niente, solo se è già nello stato d'energia-massa più basso. Tutti gli adroni – protoni, neutroni e i loro cugini, che sono centinaia – decadono a causa dell'interazione debole. L'unica eccezione, a quanto pare, è il protone libero.

La teoria dell'interazione debole è stata generalizzata a poco a poco e attraverso un confronto costante con nuovi dati si è trasformata in una teoria quantistica dei campi di questa interazione. Le ha dato

forma una nuova generazione di teorici, venuti fuori soprattutto dalle università americane: Feynman, Gell-Mann, Lee, Yang, Schwinger, Robert Marshak e molti altri (io ho sempre un incubo: tutti i teorici che non ho citato si riuniscono alla periferia di Teheran e offrono un'ammissione immediata al Paradiso del Teorico a chiunque rinormalizzi Lederman istantaneamente e totalmente).

La simmetria leggermente violata, o del perché noi esistiamo

Una proprietà cruciale dell'interazione debole è la violazione della parità. Tutte le altre forze rispettano questa simmetria, e per molti fu un colpo scoprire che ce n'era una che poteva violarla. Gli stessi esperimenti che hanno evidenziato la violazione di P (la parità) hanno dimostrato che anche un'altra simmetria molto profonda, che collega il mondo all'antimondo, non vale. Quest'altra simmetria è chiamata C, che sta per «carica coniugata», e anch'essa viene meno solo per l'interazione debole. Prima che venisse dimostrata la violazione di C si pensava che un mondo interamente composto di antimateria avrebbe obbedito alle stesse leggi fisiche del mondo normale, quello fatto della buona vecchia materia; ma i dati dicono di no. L'interazione debole non rispetta questa simmetria.

Che avrebbero dovuto fare i teorici? Si ritirarono immediatamente fino a una nuova trincea, quella della simmetria CP, la quale dice che due sistemi fisici sono essenzialmente identici se sono correlati l'uno all'altro da due trasformazioni *simultanee*: riflessione di tutti gli oggetti in uno specchio (P) e conversione di tutte le particelle in antiparticelle (C). Secondo i teorici la simmetria CP era molto più profonda, e doveva restare valida anche se la natura non rispettava né C né P, prese separatamente. Restò valida fino al 1964, quando Val Fitch e James Cronin, due fisici sperimentali di Princeton che studiavano il kaone neutro (una particella scoperta dal mio gruppo di Brookhaven durante gli esperimenti del 1956-58), trovarono indicazioni, chiare e ineludibili, del fatto che la simmetria CP era imperfetta.

Imperfetta? I teorici storsero il naso, ma l'artista che è in ognuno di noi gioì. Gli artisti e gli architetti amano stuzzicarci con quadri o strutture architettoniche che hanno una simmetria quasi esatta, ma non proprio esatta; ce ne danno un ottimo esempio i campanili asimmetrici della cattedrale di Chartres, simmetrica per tutto il resto. La violazione di CP era piccola – pochi casi su mille – ma chiara, e i teorici dovettero tornare alla casella di partenza.

Ho parlato della violazione di CP per tre ragioni. Innanzitutto è un buon esempio di quella che, per quanto riguarda le altre interazioni, abbiamo imparato a conoscere come «leggera violazione della simmetria». Se crediamo nella simmetria intrinseca della natura ci deve essere *qualcosa*, qualche agente fisico, che entra in gioco e la rompe; e c'è anche un altro tipo di agente, strettamente affine al primo, che non distrugge la simmetria ma la nasconde, facendo apparire asimmetrica la natura. Fra questi mascheratori di simmetrie c'è anche la particella di Dio; ci torneremo nel capitolo VIII. La seconda ragione per cui ricordo la violazione di CP è che negli anni Novanta abbiamo un urgente bisogno di capire questo concetto per sistemare i problemi del nostro modello standard.

L'ultima ragione, quella che ha conquistato all'esperimento di Fitch-Cronin l'attenzione e il rispetto della Reale Accademia svedese delle scienze, è che la violazione di CP, quando è applicata ai modelli cosmologici di evoluzione dell'universo, spiega un enigma che perseguitava l'astrofisica da cinquant'anni. Prima del 1957, numerosi esperimenti indicavano che fra materia e antimateria c'era una simmetria perfetta; ma se sono così simmetriche perché il nostro pianeta, il nostro sistema solare, la nostra galassia e, stando ai dati di cui disponiamo, anche le altre non hanno antimateria? E come è stato possibile che un esperimento eseguito a Long Island nel 1965 spiegasse tutto questo?

I modelli indicavano che, mentre l'universo si raffreddava dopo il Big Bang, materia e antimateria si sono completamente annichilate a vicenda, lasciando dietro di sé, essenzialmente, radiazione pura ormai troppo fredda – con troppo poca energia – per creare nuova materia. Ma la materia siamo noi! E perché esistiamo? L'esperimento di Fitch-Cronin ha indicato una via d'uscita: la simmetria non è perfetta, c'è un piccolo eccesso di materia sull'antimateria (un quark in più ogni 100 milioni di coppie quark-antiquark) prodotto da questa lieve violazione della simmetria CP, e tale piccolo eccesso rende conto di tutta la materia che si osserva attualmente nell'universo, noi compresi. Grazie Fitch, grazie Cronin: ragazzi splendidi.

Intrappolare il piccolo elemento neutro

Le nostre informazioni dettagliate sull'interazione debole ci sono state fornite, in gran parte, da fasci di neutrini, e qui c'è un'altra storia da raccontare. Fra il 1930 e il 1960 l'ipotesi formulata da Pauli nel 1930 – che esista una piccola particella neutra soggetta solo all'interazione debole – era stata controllata in molti modi. Le misurazioni,

estremamente precise, condotte su un numero sempre più grande di nuclei e particelle soggetti a decadimento debole confermavano, tendenzialmente, l'ipotesi che dalla reazione uscisse qualcosa di piccolo e neutro che si portava via energia e momento. Come interpretazione delle reazioni di decadimento era comoda, ma si potevano osservare veramente i neutrini?

Non era facile. I neutrini attraversano, rimanendo intatti, enormi spessori di materia perché ubbidiscono solo all'interazione debole, che è a breve raggio (il che riduce immensamente le probabilità di collisione). È stato calcolato che per garantire la collisione di un neutrino con la materia ci vorrebbe una lastra di piombo spessa un anno luce; un esperimento davvero costoso da preparare. Se però usiamo un numero di neutrini molto grande, lo spessore richiesto per osservare di tanto in tanto una collisione si riduce in modo corrispondente. A metà degli anni Cinquanta, come fonte di neutrini (e di tanta radioattività!) si usavano i reattori nucleari, ai quali si esponevano enormi serbatoi di dicloruro di cadmio (sempre meno costosi di un anno luce di piombo). Con tutti quei neutrini (o meglio antineutrini, perché i reattori producono soprattutto questi), è inevitabile che qualcuno di loro colpisca un protone provocando un decadimento beta inverso, e quindi l'emissione di un neutrone e un positrone. Il positrone viaggia finché trova un elettrone, e i due si annichilano producendo due fotoni che vanno in direzioni opposte, fino a un fluido detergente depurato che, quando colpito, lampeggia. L'osservazione di un neutrone e di una coppia di fotoni ha rappresentato la prima conferma sperimentale del neutrino, circa trentacinque anni dopo l'ipotesi di Pauli.*

Ma nel 1959 un'altra crisi – anzi due – tolse la pace ai fisici. L'epicentro della tempesta era l'Università della Columbia, ma la crisi fu generosamente condivisa e apprezzata in tutto il mondo. Tutti i dati sull'interazione debole disponibili all'epoca erano messi gentilmente a disposizione dalle particelle durante il loro decadimento naturale; non c'è nulla che una particella ami più del dare tutta se stessa per edificazione dei fisici. Per studiare l'interazione debole ci limitavamo a osservare certe particelle, per esempio il neutrone o il pione, decadere in altre; l'energia era fornita dalla massa a riposo della particella che decadeva, la quale normalmente andava da pochi MeV a circa 100. Una volta modificata la teoria dell'interazione debole con i dati sperimentali sulla violazione della parità, avevamo un fantastilionesimo di un'elegantissima teoria che si armonizzava con tutti i dati forniti da fantastilioni di decadimenti nucleari nonché dai decadimenti di pioni, muoni, lambda e probabilmente (benché fosse difficile da dimostrare) dalla decadenza della civiltà occidentale.

* In realtà, venticinque. (*NdT*)

L'equazione che esplode

La crisi numero 1 aveva a che fare con la matematica dell'interazione debole. Nelle equazioni compare l'energia alla quale l'interazione viene misurata; ci si basa, a seconda dei dati, sulla massa a riposo della particella che decade – 1,65 MeV, 37,2 MeV o quello che è – ed ecco che spunta la risposta giusta. Si manipolano i termini, si gonfia, si lima, e prima o poi vengono fuori le previsioni delle vite medie, dei decadimenti, degli spettri degli elettroni (tutte cose che si possono confrontare con gli esperimenti), e sono giuste. Ma se poniamo, per esempio, un valore di 100 GeV (*miliardi* di elettronvolt), la teoria va in briciole, l'equazione vi esplode in faccia. Nel gergo dei fisici questa si chiama «crisi dell'unitarietà».

Il dilemma era questo: l'equazione era splendida, ma aveva una patologia alle alte energie. Funzionava con i numeri piccoli, non con quelli grossi; e non avevamo in mano la verità ultima, ma solo una verità valida per le basse energie. Doveva pur esserci una fisica nuova, capace di modificare l'equazione alle alte energie.

La crisi numero 2 era il mistero della reazione non osservata. Potevamo calcolare la frequenza con cui un muone decade in un elettrone e un fotone; secondo la nostra teoria dei processi deboli, questa reazione doveva esistere. La sua ricerca era uno degli esperimenti favoriti del Nevis, e Dio solo sa quante sono state le ore perse inutilmente dai ricercatori a perlustrare i fasci di particelle. Molti attribuiscono a Murray Gell-Mann, il grande esperto di tutti gli arcani, la cosiddetta «regola totalitaria della fisica», «Tutto ciò che non è proibito è obbligatorio»: se le nostre leggi non escludono un fatto, quel fatto non solo *può*, ma *deve* accadere! Ma allora, se il decadimento di un muone in elettrone e fotone non era proibito, perché non lo vedevamo? Che cosa impediva questo decadimento mu-e-gamma (dove «gamma» sta per «fotone»)?

Entrambe le crisi erano eccitanti; entrambe aprivano nuove possibilità in fisica. Le speculazioni teoriche abbondavano, ma il sangue sperimentale bolliva. Che fare? Noi sperimentali dovevamo misurare, martellare, segare, limare, impilare mattoni di piombo: fare *qualcosa*. E lo facemmo.

L'anonima omicidi e l'esperimento dei due neutrini

Nel novembre del 1959 Melvin Schwartz, assistente all'Università della Columbia, dopo avere ascoltato un dettagliato resoconto di tutte queste difficoltà tenuto da un teorico della stessa università, T.D. Lee, tirò fuori la sua GRANDE IDEA: perché non creare un fascio di neutrini facendo attraversare a dei pioni ad alta energia uno spazio sufficiente perché una certa frazione degli stessi – diciamo il 10% – decadesse in coppie muone-neutrino? I pioni sarebbero scomparsi in volo, al loro posto sarebbero apparsi muoni e neutrini ancora dotati dell'energia originaria dei pioni, e a quel punto ci sarebbero stati, in volo attraverso lo spazio, i muoni e neutrini prodotti dal 10% di pioni decaduti, più il 90% di quelli non decaduti, più gli abbondanti detriti nucleari usciti dal bersaglio che produceva i pioni. Bene, Schwartz osservò che si poteva convogliare il tutto verso una grossa parete d'acciaio, bella spessa; venne fuori che dodici metri sarebbero andati benissimo. Questa parete avrebbe fermato tutto meno i neutrini, che non avevano problemi ad attraversare anche dodici milioni di chilometri d'acciaio; dall'altro lato ci sarebbe stato un fascio di neutrini puro, e poiché queste particelle obbediscono solo all'interazione debole, avremmo avuto a disposizione un modo molto pratico di studiare, attraverso le collisioni neutriniche, sia l'interazione debole sia i neutrini stessi.

Il progetto rispondeva sia alla crisi numero 1 sia alla crisi numero 2; l'idea di Mel, infatti, era che con questo fascio di neutrini avremmo potuto studiare l'interazione debole a energie di miliardi di elettronvolt, anziché di milioni. Avremmo potuto farci un'idea del comportamento di questa interazione alle alte energie e forse anche capire, basandoci sull'ipotesi che nella cosa fossero implicati in qualche modo i neutrini, perché non vedevamo i muoni decadere in elettroni e fotoni.

Come spesso accade nella scienza, un'idea all'incirca equivalente fu pubblicata, quasi contemporaneamente, da un fisico sovietico, Bruno Pontecorvo. Se questo nome sembra più italiano che russo è perché Bruno è effettivamente un italiano, passato dalla parte di Mosca negli anni Cinquanta per ragioni ideologiche; ma la sua fisica, le sue idee, la sua immaginazione erano di prim'ordine. La tragedia di Bruno è stata tutta nel tentativo di realizzare delle idee ricche di fantasia all'interno di un mortificante sistema burocratico. I congressi internazionali sono delle sedi nelle quali la calda amicizia tradizionale fra gli scienziati ha modo di manifestarsi; e durante uno di

questi congressi, a Mosca, chiesi a un amico: «Evgenij, dimmi, chi di voi fisici sovietici è veramente comunista?». L'amico si guardò in giro e indicò Pontecorvo. Ma eravamo nel 1960.

Quando, alla fine del 1959, tornai all'Università della Columbia dopo il mio piacevole anno sabbatico al CERN, ascoltai molte discussioni sulle crisi nel campo delle interazioni deboli e sull'idea di Schwartz. Egli era arrivato alla conclusione che nessuno degli acceleratori esistenti era abbastanza potente da creare un fascio di neutrini sufficientemente intenso, ma io non ero d'accordo. L'AGS (*Alternating Gradient Synchrotron*, sincrotrone a gradiente alternato) da 30 GeV di Brookhaven era quasi completo; calcolai i parametri e mi convinsi – dopodiché convinsi anche Schwartz – che l'esperimento era fattibile. Così progettammo quello che per il 1960 era un esperimento colossale. Si unì a noi Jack Steinberger, un collega dell'università, e con alcuni studenti e ricercatori formammo un gruppo di sette persone. Io, Jack e Mel eravamo ben conosciuti per il nostro modo di fare gentile e delicato. Una volta, mentre passavamo per la stanza dell'acceleratore a Brookhaven, sentii un fisico, circondato da un gruppo di amici, che diceva: «Ecco l'anonima omicidi!».

Per bloccare tutte le particelle meno i neutrini costruimmo, usando migliaia di tonnellate d'acciaio proveniente da navi in disarmo, una parete molto spessa intorno a un massiccio rivelatore. Una volta commisi l'errore di dire a un giornalista che stavamo facendo a pezzi la corazzata *Missouri* per costruire quella parete; ma il nome doveva essere sbagliato, perché a quanto pare la *Missouri* è ancora in giro, da qualche parte. Quello che è certo è che ci arrivò una corazzata, tagliata a pezzi e a prezzo di rottame. Sbagliai anche a dire, scherzando, che se ci fosse stata una guerra avremmo dovuto rimetterla insieme; la storia cominciò a circolare (con qualche abbellimento), e ben presto nacque la voce che la marina aveva confiscato il nostro esperimento per fare la guerra (resta un mistero che guerra avrebbe potuto essere: era il 1960).

Ci sono stati dei ricami anche sulla storia del cannone. Avevamo trovato un cannone navale con trenta centimetri di calibro, una canna adatta e pareti belle spesse; era uno splendido collimatore (l'aggeggio che serve a mettere a fuoco e dirigere un fascio di particelle). Volevamo riempirlo con del berillio (per fare da filtro), ma la canna aveva delle scanalature profonde, fatte per dirigere i proiettili; perciò mandai dentro un dottorando, magro come un chiodo, a riempire queste scanalature con lana d'acciaio. Rimase dentro circa un'ora, venne fuori strisciando, accaldato, sudato e furibondo, e disse: «Io

mi licenzio». «Non puoi!» gli gridai. «Dove lo trovo un altro studente del tuo calibro?»

Una volta terminati i preparativi, l'acciaio delle navi in disarmo circondava un rivelatore formato da dieci tonnellate d'alluminio, disposte, con molta ingegnosità, in modo che se un neutrino avesse urtato un nucleo d'alluminio i prodotti della collisione sarebbero stati osservati. L'idea del rivelatore che alla fine avevamo deciso di usare – una cosiddetta camera a scintille – era dovuta a un fisico giapponese, Shuji Fukui; imparammo un sacco di cose in proposito parlando con Jim Cronin di Princeton, già padrone di questa nuova tecnica, e poi Schwartz vinse la gara del migliore progetto di ingrandimento (bisognava passare da pochi chilogrammi a dieci tonnellate). La nostra camera a scintille conteneva delle piastre d'alluminio ben levigate spesse due centimetri e mezzo e spaziate di poco più di un centimetro; fra due piastre adiacenti c'era una differenza di voltaggio colossale. Se una particella carica fosse passata nel gap, il suo percorso sarebbe stato seguito da una scintilla, e quindi sarebbe stato possibile fotografarlo. È facile a dirsi, ma il sistema aveva i suoi problemi tecnici. Che risultati, però. Zac!, e il cammino di una particella subnucleare diventava visibile nella luce rosso-giallastra del neon. Era un magnifico strumento.

Costruimmo dei modellini di camera a scintille e li esponemmo ai fasci di elettroni e pioni per studiarne le caratteristiche. All'epoca la maggior parte di queste camere era di trenta centimetri per trenta e aveva da dieci a venti piastre; quella progettata da noi aveva cento piastre di lato quadruplo, tutte che supplicavano i neutrini di urtarle, con i loro due centimetri e mezzo di spessore. Lavoravamo tutti e sette giorno e notte, e anche in altri orari, per mettere insieme l'apparato e l'elettronica, e inventammo aggeggi d'ogni sorta (cavità emisferiche per le scintille, sistemi automatici di saldatura, circuiti vari). Ci aiutavano diversi tecnici e ingegneri.

L'esperimento fu avviato verso la fine del 1960 e subito fummo perseguitati dai «rumori» di fondo dovuti ai neutroni e ad altri detriti provenienti dal bersaglio, che riuscivano ad aggirare i nostri formidabili dodici metri d'acciaio, si infilavano nelle camere a scintille, ci facevano sballare i risultati. Anche se erano una su un miliardo, le particelle che riuscivano a passare creavano dei problemi; e il fatto che «una su un miliardo» sia la definizione legale di «miracolo» possiamo relegarlo sullo sfondo. Lottammo per settimane, tappando tutte le fessure nelle quali si potevano infilare dei neutroni; andammo scrupolosamente in cerca di tutti i cavi elettrici sotto il pavimento (una

volta Mel Schwartz, durante queste esplorazioni, si infilò in un pozzetto, rimase bloccato e per tirarlo fuori ci vollero diversi operai belli robusti). Tutte le zone più sottili furono rafforzate con blocchi del rugginoso acciaio dell'ex corazzata. A un certo punto il direttore dell'acceleratore di Brookhaven (nuovo di zecca) cercò di fermarci: «Per impilare quei luridi blocchi accanto alla mia macchina dovrete metterli sul mio corpo!» tuonò. Non raccogliemmo la sua proposta, perché nella schermatura si sarebbe creato un rigonfiamento molto brutto da vedere, e accettammo un compromesso, piccolo piccolo. A fine novembre il rumore di fondo si era ridotto a proporzioni tollerabili.

Adesso vi spiego che cosa stavamo facendo.

I protoni dell'AGS colpivano un bersaglio, producendo, in media, tre pioni per ogni collisione; le collisioni erano circa 10^{11} (100 miliardi) al secondo. Generavamo anche un assortimento di neutroni e protoni, con qualche antiprotone e altri detriti; quelli che venivano dalla nostra parte attraversavano uno spazio di circa sette metri e mezzo prima di spiaccicarsi sul nostro impenetrabile muro d'acciaio, e lungo il percorso decadeva circa il 10% dei pioni, per cui ci ritrovavamo con qualche decina di miliardi di neutrini; ma il numero di quelli che andavano nella direzione giusta, verso la nostra parete d'acciaio spessa dodici metri, era molto più piccolo. Dall'altra parte, a circa trenta centimetri dalla parete, era in attesa il nostro rivelatore, la camera a scintille. Avevamo calcolato che, con un po' di fortuna, avremmo osservato una collisione neutrinica alla settimana in questa camera a scintille d'alluminio! In una settimana il bersaglio avrebbe spruzzato nella nostra direzione circa 500 milioni di miliardi (5×10^{17}) di particelle; per questo dovevamo ridurre i rumori di fondo così brutalmente.

Ci aspettavamo due tipi di collisioni neutriniche: (1) un neutrino urta un nucleo d'alluminio producendo un muone e un nucleo eccitato, (2) un neutrino urta un nucleo producendo un elettrone e un nucleo eccitato. I nuclei possiamo dimenticarli; la cosa importante è che ci aspettavamo che dalle collisioni emergesse un numero uguale di elettroni e muoni, accompagnati sporadicamente da qualche pione e da altri detriti del nucleo eccitato.

La virtù trionfò, e in otto mesi osservammo cinquantasei collisioni neutriniche (ma cinque, forse, erano fasulle). A dirlo sembra facile, ma non dimenticherò mai la prima comparsa di un neutrino. Avevamo sviluppato una pellicola che era il risultato di una settimana passata a raccogliere dati; quasi tutte le istantanee o erano vuote o mostravano tracce chiaramente dovute a raggi cosmici. E poi, di

colpo, eccola lì: una collisione spettacolare con la traccia, lunghissima, di un muone che si allontanava a gran velocità. Quel primo episodio fu un minieureka, fu, dopo tanti sforzi, la fulminea certezza che l'esperimento funzionava.

Prima di tutto dovevamo dimostrare che quelli erano veramente degli eventi neutrinici; il nostro era, in assoluto, il primo esperimento di quel tipo. Mettemmo insieme tutte le nostre esperienze e facemmo a turno gli avvocati del diavolo, cercando ogni possibile falla nelle nostre conclusioni; ma i dati erano solidi come roccia, ed era tempo di renderli pubblici. Ci sentivamo abbastanza sicuri da presentare i risultati ai nostri colleghi. Avreste dovuto sentire Schwartz parlare nell'auditorium di Brookhaven, strapieno: escluse una dopo l'altra, come un avvocato, tutte le alternative possibili. Fra il pubblico c'erano sorrisi e lacrime; dovettero portare fuori la madre di Mel, che singhiozzava e non si controllava più.

Le conseguenze principali dell'esperimento erano tre (sempre tre). Si ricorderà che era stato Pauli il primo a supporre l'esistenza del neutrino per spiegare l'energia che viene a mancare nel decadimento beta, nel quale un elettrone viene espulso dal nucleo: ma in quasi tutti i nostri eventi il prodotto della collisione neutrinica era un muone. I *nostri* neutrini si rifiutavano di produrre elettroni. Perché?

Fummo costretti a concludere che i neutrini che usavamo avevano una nuova proprietà specifica, la «muonità»; poiché nascevano insieme a un muone dal decadimento del pione, possedevano, in qualche modo, un'impronta «muonica».

Per dimostrare a un pubblico di scettici, tali per condizionamento genetico, che le cose stavano così, dovevamo sapere e provare che il nostro apparato non era predisposto per vedere muoni, che non era incapace, per una cattiva progettazione, di osservare gli elettroni. Era di nuovo il problema del telescopio di Galileo. Per fortuna riuscimmo a dimostrare ai nostri critici che i nostri strumenti erano capaci di rivelare gli elettroni e che questa capacità era stata verificata con dei fasci di prova composti appunto di elettroni.

Un altro effetto di fondo veniva dai raggi cosmici, che al livello del mare sono composti di muoni. Dei fisici meno bravi di noi avrebbero potuto scambiare un muone cosmico che entrava nel rivelatore da dietro e si fermava a metà per un muone prodotto da un neutrino in uscita, che era poi quello che noi cercavamo. Avevamo installato un «blocco» contro questo effetto, ma come facevamo a essere sicuri che funzionava?

La soluzione stava nel tenere il rivelatore in funzione anche quando la macchina era staccata, il che accadeva per circa metà del tempo. I muoni che comparivano mentre l'acceleratore era spento potevano essere solo dei raggi cosmici che si presentavano senza invito, solo che non ne comparve nessuno. I raggi cosmici non erano in grado di superare il nostro blocco.

Ricordo tutti questi particolari tecnici per farvi capire che la sperimentazione non è una cosa facile, e per interpretare un esperimento ci vuole sottigliezza. Una volta, davanti all'ingresso di una piscina, Heisenberg disse a un collega: «Queste persone entrano ed escono vestite di tutto punto. Ne concludi che nuotano vestite?».

La conclusione che noi – insieme a molti altri – ricavammo da quell'esperimento fu che in natura esistono (almeno) due neutrini, uno associato agli elettroni (è il neutrino liscio di Pauli, alla vaniglia) e uno ai muoni; perciò li chiamiamo neutrino elettronico (quello liscio) e neutrino muonico (quello prodotto nel nostro esperimento). Oggi nel bizzarro gergo del modello standard questa distinzione è nota come *sapore*, e ormai è in uso una semplice tavola,

neutrino elettronico	neutrino muonico
elettrone	muone

o, nella stenografia della fisica,

ν_e	ν_μ
e	μ

L'elettrone sta sotto suo cugino, il neutrino elettronico (si veda il deponente), e il muone sotto il neutrino muonico, che è pure suo cugino. Ricordiamo che prima di questo esperimento si conoscevano tre leptoni – e, ν e μ – non soggetti all'interazione forte; ora ce n'erano quattro: e, ν_e, ν_μ e μ. L'esperimento è sempre stato chiamato «dei due neutrini», che per gli ignoranti sono una coppia di ballerini italiani; ed è questo il bottone intorno al quale è stato cucito il soprabito del modello standard. È da notare che ci sono due «famiglie» di leptoni – particelle puntiformi – disposte in verticale nella tavola: la prima è formata dall'elettrone e dal neutrino elettronico, che si trovano ovunque nell'universo, la seconda è formata dal muone e dal neutrino muonico. Oggi i muoni non sono facili da trovare nel cosmo, e si fabbricano solo negli acceleratori o in altre collisioni ad alta energia, come quelle provocate dai raggi cosmici. Al tempo in cui l'universo era giovane e caldo, queste particelle abbondavano; e

quando venne scoperto il muone, che è un fratello pesante dell'elettrone, I.I. Rabi chiese: «Chi l'ha ordinato?». L'esperimento dei due neutrini ha fornito uno dei primi indizi della risposta giusta.

Proprio così. L'esistenza di due neutrini diversi ha risolto la crisi della reazione mu-e-gamma mancante. Ricapitolando: un muone sarebbe dovuto decadere in elettrone e fotone ma, nonostante i numerosi tentativi, nessuno era riuscito a osservare questa reazione. Avrebbe dovuto verificarsi questa successione di processi: prima il muone decade in un elettrone e due neutrini, un neutrino vero e proprio e un antineutrino; poi i due neutrini, essendo rispettivamente materia e antimateria, si annichilano producendo il fotone. I fotoni, però, non li vedeva nessuno. Ma ora la ragione era evidente: è vero che il muone positivo decade in un positrone e due neutrini, ma questi ultimi sono un neutrino elettronico e un antineutrino muonico, e non si annichilano a vicenda perché sono di famiglie diverse. Si limitano a restare neutrini, non si produce nessun fotone e non c'è reazione mu-e-gamma.

La seconda conseguenza dell'esperimento dell'anonima omicidi è stata la costruzione di un nuovo strumento per fare fisica: neutrini correnti, caldi e freddi, che a tempo debito hanno fatto la loro comparsa al CERN, al Fermilab, a Brookhaven e a Serpuhov (ex Unione Sovietica). Ricordiamo che prima dell'esperimento dell'AGS non si era completamente sicuri dell'esistenza dei neutrini; ora se ne potevano avere interi fasci su ordinazione.

Forse qualcuno ha notato che qui sto evitando una questione. Che ne è stato della crisi numero 1, del fatto che l'equazione dell'interazione debole non funziona più alle alte energie? In verità il nostro esperimento del 1961 aveva già dimostrato che le collisioni *aumentavano* al crescere dell'energia, e negli anni Ottanta i laboratori ricordati sopra – usando fasci più intensi, energie più elevate e rivelatori di centinaia di tonnellate – raccoglievano ormai milioni di eventi neutrinici, al ritmo di diversi al minuto (un bel miglioramento rispetto all'uno o due alla settimana del 1961). Nemmeno questo ha risolto la crisi delle interazioni deboli alle alte energie, anche se ha chiarito molte cose; il ritmo delle collisioni neutriniche è effettivamente salito al crescere dell'energia, come prevedeva la teoria per le basse energie. Il timore che aumentasse troppo, fino all'impossibile, è stato attenuato, in ogni caso, dalla scoperta della particella W nel 1982; tale scoperta si inseriva in una nuova fisica che ha modificato la teoria, portandola a un comportamento più simpatico e gentile. Ciò ha ritardato la crisi, alla quale, però, dovremo tornare.

Debito brasiliano, minigonne e viceversa

La terza conseguenza dell'esperimento fu che Schwartz, Steinberger e Lederman ottennero il premio Nobel per la fisica, ma solo nel 1988, cioè ventisette anni dopo che la ricerca era stata condotta. Ho sentito, da qualche parte, di un giornalista che intervistava il figlio, molto giovane, di uno che aveva appena ricevuto il premio: «Le piacerebbe vincere il Nobel come suo padre?». «No» risponde il giovanotto. «E perché?» «Voglio vincerlo da solo.»

Il premio. Alcune cose da dire le ho. Il Nobel ispira un timore reverenziale a molti di noi fisici, probabilmente perché lo hanno avuto persone illustri, a cominciare da Röntgen (1901), e dopo di lui molti dei nostri eroi, come Rutherford, Einstein, Bohr e Heisenberg. Il premio dà una certa aura al collega che lo vince; anche quando il vincitore è il tuo migliore amico, uno insieme al quale sei andato per boschi, lo trasforma, in qualche modo, ai tuoi occhi.

Sapevo di essere stato diverse volte fra i candidati. Immagino che avrei potuto essere premiato per il «kaone neutro di lunga vita» da me scoperto nel 1956: un oggetto veramente insolito, che oggi viene usato per studiare certi aspetti cruciali della simmetria CP. Avrei potuto essere premiato (con C.S. Wu) anche per la ricerca sulla parità pione-muone, ma Stoccolma aveva preferito onorare i suoi ispiratori teorici. Era stata una decisione ragionevole; tuttavia uno dei sottoprodotti della ricerca, la scoperta dei muoni polarizzati e del loro decadimento asimmetrico, aveva avuto applicazioni massicce nella teoria dello stato solido e nella fisica atomica e molecolare, tanto che oggi si tengono regolarmente dei congressi internazionali su questo argomento.

Nello scorrere degli anni, ottobre era, regolarmente, un mese nervoso, e quando venivano annunciati i nomi dei premiati ricevevo spesso una telefonata da questo o quello dei miei affezionati pupilli: «Come mai?». In realtà ci sono molti fisici – e questo vale certamente anche per i candidati di chimica, di medicina e dei premi non scientifici – che non avranno mai il premio, ma le cui imprese equivalgono a quelle di coloro che l'hanno ricevuto. Perché mai? Non lo so. È anche questione di fortuna, di circostanze, del volere di Allah.

Io ho avuto fortuna, e i riconoscimenti non mi sono mai mancati. Nel 1958 sono stato nominato professore ordinario all'Università della Columbia, con uno stipendio ragionevole, per fare le cose che mi piace fare (quello di professore in un'università americana è il miglior lavoro di tutta la civiltà occidentale. Puoi fare tutto quello

che ti pare, perfino insegnare!). Ho fatto ricerca molto intensamente, e fra il 1956 e il 1979 (quando sono diventato direttore del Fermilab) sono stato aiutato da qualcosa come cinquantadue dottorandi. I riconoscimenti sono arrivati quasi sempre mentre ero troppo occupato per aspettarli: l'ammissione all'Accademia nazionale della scienza (1964), la medaglia presidenziale per la scienza (me l'ha data Lyndon Johnson nel 1965) e varie altre medaglie e menzioni onorifiche. Nel 1983 ho avuto, insieme a Martin Perl, il premio Wolf, assegnato dallo stato di Israele, per la scoperta della terza generazione di quark e leptoni (quark **b** e leptone tau). Sono arrivate anche delle lauree ad honorem, ma qui l'offerta supera la domanda, dato che ogni anno centinaia di università cercano quattro o cinque persone a cui darle. Con tutta questa roba, uno comincia ad acquisire una giusta dose di calma e tranquillità verso il Nobel.

Quando finalmente arrivò, sotto forma di telefonata, alle sei di mattina del 10 ottobre 1988, la notizia diede la stura a un'allegria sfrenata, tenuta in serbo fino a quel momento. Dopo averla accolta molto rispettosamente, io e mia moglie Ellen ci mettemmo a ridere come due isterici, dopodiché il telefono cominciò a squillare e le nostre vite cominciarono a cambiare. Quando un giornalista del «New York Times» mi chiese che cosa avrei fatto con i soldi del premio, gli dissi che ero incerto fra comprare un allevamento di purosangue o un castello in Spagna, e questa dichiarazione fu stampata tale e quale. La settimana dopo, che ci crediate o no, mi telefonò un vero agente immobiliare, che magnificò a lungo un maniero in Castiglia.

Vincere un premio Nobel quando si possiede già una discreta posizione ha degli effetti collaterali interessanti. Io ero direttore del Fermilab, che ha 2200 dipendenti, e il personale si beava della pubblicità; per loro quell'occasione era una sorta di regalo di Natale anticipato. Dovemmo ripetere diverse volte una riunione generale di tutto il laboratorio perché ognuno potesse ascoltare il capo, che era già abbastanza divertente ma di colpo fu considerato allo stesso livello di Johnny Carson (e intanto c'erano delle persone veramente importanti che lo prendevano sul serio). Il «Sun-Times» di Chicago sparò un titolone che mi colpì, IL NOBEL FA CENTRO, e il «New York Times» mise in prima pagina una mia foto con la lingua fuori, proprio a centro pagina!

Queste cose passano e svaniscono, ma non è svanito il timore reverenziale del pubblico di fronte al titolo. In vari ricevimenti, un po' per tutta la città, sono stato presentato come il vincitore del premio Nobel del 1988 *per la pace* in fisica; e quando ho cercato di fare qual-

cosa di abbastanza spettacolare, e forse di temerario, per aiutare le scuole pubbliche di Chicago, l'acqua santa del Nobel ha funzionato. La gente ha ascoltato, le porte si sono aperte, e di colpo abbiamo avuto un programma per migliorare l'istruzione scientifica nelle scuole del centro cittadino. Il premio è come una tessera che facilita in modo incredibile le attività di recupero sociale. Il rovescio della medaglia è che, qualunque sia la cosa per cui hai vinto il premio, diventi immediatamente un esperto di tutto. Il debito pubblico del Brasile? Sì, certo. La sicurezza sociale? Sì, sì. «Mi dica, professor Lederman, quanto saranno lunghe le gonne?» «Il meno possibile!» risponde il Nobel, con la lussuria in cuore. Ma la cosa che voglio veramente fare è sfruttare svergognatamente il premio per far progredire l'istruzione scientifica negli Stati Uniti; anzi, per questo lavoro mi farebbe comodo un secondo Nobel.

L'interazione forte

I trionfi ottenuti dipanando l'intrico delle interazioni deboli erano considerevoli; ma eravamo ancora perseguitati da centinaia di adroni, una folla di particelle, tutte soggette all'interazione forte, che è quella che tiene insieme il nucleo. Queste particelle avevano una serie di proprietà fra le quali abbiamo già ricordato la carica, la massa e lo spin.

Prendiamo, per esempio, i pioni. Ce ne sono di tre tipi diversi, con masse molto vicine, e dopo essere stati studiati in una serie di collisioni sono stati raccolti, guarda caso, nella famiglia dei pioni; hanno carica elettrica più uno, meno uno e zero, o neutra. È risultato che tutti gli adroni sono riuniti in gruppi di famiglie; la serie dei kaoni è K^+, K^-, K^0, $\bar{K}^0$ (gli esponenti +, – e 0 indicano la carica elettrica; la lineetta sopra il secondo kaone neutro indica che si tratta di un'antiparticella); il ritratto di famiglia dei sigma è Σ^+, Σ^0, Σ^-. Una famiglia più nota è quella dei nucleoni: il protone e il neutrone, che compongono il nucleo atomico.

Le famiglie sono formate da particelle con massa analoga e comportamento analogo nelle collisioni forti; per esprimere questa idea in modo più specifico è stato inventato il termine «spin isotopico», o isospin. L'isospin è utile perché ci permette di considerare il concetto di «nucleone», inteso come oggetto unico che si presenta in due stati di isospin, neutronico e protonico; analogamente, si presenta in tre stati di isospin (π^+, π^-, π^0) il «pione». Un'altra proprietà molto utile dell'isospin è che nelle collisioni forti si conserva, come la carica:

una violenta collisione fra un protone e un antiprotone può produrre anche quarantasette pioni, otto barioni e altro materiale, ma il numero dello spin isotopico totale rimane costante.

Il fatto è che i fisici cercavano di capire qualcosa di questi adroni classificandoli secondo tutte le proprietà che riuscivano a trovare. È per questo che ci sono tante proprietà con dei nomi eccentrici: numero di stranezza, numero barionico, numero iperonico, e via dicendo. Perché «numero»? Perché sono tutte proprietà quantiche, quindi con numeri quantici; e i numeri quantici ubbidiscono a dei principi di conservazione. Questo permetteva ai teorici, e agli sperimentatori rimasti senza esperimenti da fare, di divertirsi con gli adroni classificandoli e – ispirati, forse, dai biologi – raccogliendoli in strutture familiari allargate. I teorici si facevano guidare da regole di simmetria matematica e sembravano decisamente convinti che le equazioni fondamentali avrebbero rispettato queste profonde simmetrie.

Ebbe un particolare successo la riorganizzazione escogitata nel 1961 dal teorico del Cal Tech Murray Gell-Mann, che chiamò «ottuplice via» (dall'insegnamento di Buddha: «Questa è la nobile ottuplice via: cioè retta visione, retta intenzione, retta parola...») il suo schema. Gell-Mann riuscì, quasi magicamente, ad associare gli adroni in gruppi compatti di otto o dieci unità; l'allusione al buddismo era un'altra di quelle licenze capricciose così comuni in fisica, ma diversi mistici si buttarono sul termine come se fosse stato prova che il vero ordine del mondo è collegato al misticismo orientale.

Nei tardi anni Settanta, quando mi chiesero di scrivere una breve autobiografia per il notiziario del Fermilab in occasione della scoperta del quark «basso», mi trovai nei pasticci. Poiché mi aspettavo che nessuno lo leggesse, a parte i miei collaboratori a Batavia, intitolai il pezzo *Autobiografia non autorizzata* e lo firmai Leon Lede-rman. Ma la storia fu ripresa e ristampata, con mio sommo orrore, dal notiziario del CERN e poi da «Science», organo ufficiale dell'Associazione americana per il progresso delle scienze, una rivista letta da centinaia di migliaia di scienziati; e comprendeva questo passo: «Il suo [di Lederman] periodo di massima attività iniziò nel 1956, quando sentì una conferenza di Gell-Mann sulla possibile esistenza di un mesone K neutro. Prese allora due decisioni: innanzitutto cominciò a scrivere il suo cognome con un trattino...».

Un teorico farebbe comunque un'opera gradita, anche con un altro nome, e l'ottuplice via di Gell-Mann diede origine a diagrammi degli adroni che ricordavano la tavola periodica degli elementi di Mendeleev, anche se, per ammissione generale, erano più enigmatici. Ricordate il diagramma di Mendeleev, con gli elementi incolonnati che hanno proprietà chimiche simili? Questa periodicità indicava che doveva esistere un'organizzazione interna; era un indizio della struttura «a gusci» degli elettroni, prima ancora che si conoscessero gli elettroni. Qualcosa, dentro gli atomi, si ripeteva secondo uno schema man mano che gli atomi stessi aumentavano di grandezza; retrospettivamente, dopo avere capito l'atomo, possiamo dire che questo avrebbe dovuto essere ovvio.

L'urlo del quark

Anche la tavola degli adroni, messa insieme assemblando numeri quantici assortiti, invocava a gran voce una sottostruttura. Non è facile sentire le urla di entità subnucleari; ma due fisici dall'orecchio fine ci riuscirono, e scrissero qualcosa in proposito. Gell-Mann propose di ammettere l'esistenza di quelle che chiamava «strutture matematiche» e nel 1964 ipotizzò che si potesse spiegare lo schema dell'organizzazione degli adroni purché fossero esistite tre «costruzioni logiche» che chiamò «quark»; generalmente si pensa che abbia preso questa parola dal diabolico *Finnegans Wake* di James Joyce («Tre quark per Muster Mark!»). Il suo collega George Zweig ebbe la stessa identica idea mentre lavorava al CERN, e chiamò «assi» i suoi tre oggetti.

Probabilmente non sapremo mai come sia nata questa idea germinale; secondo una versione, che conosco perché anch'io ero sul posto, la cosa accadde all'Università della Columbia nel 1963. Gell-Mann stava tenendo un seminario sulla sua simmetria degli adroni – l'ottuplice via – quando Robert Serber, un teorico dell'università, osservò che una delle possibili basi di questa organizzazione a otto implicava l'esistenza di tre sottounità. Gell-Mann si disse d'accordo: ma se tali sottounità erano particelle, dovevano possedere una proprietà inaudita, quella di avere cariche elettriche espresse in *terzi* dell'unità: 1/3, 2/3, – 1/3, e così via.

Nel mondo delle particelle le cariche elettriche si misurano tutte prendendo come unità la carica dell'elettrone, e tutti gli elettroni hanno una carica di esattamente $1{,}602193 \times 10^{-19}$ coulomb. Non importa che cosa sia un coulomb; basta sapere che questo numero così complicato è usato come unità di carica, e lo chiamiamo 1 perché è la carica dell'elettrone. Anche il protone ha carica 1, il che è molto comodo; anche il pione carico elettricamente; anche il muone (qui la precisione è molto più alta), e così via. In natura le cariche hanno va-

lori interi 0, 1, 2, ..., dove questi interi vanno intesi come multipli del numero di coulomb indicato sopra. Inoltre, esse sono di due tipi, positivo e negativo; non sappiamo perché, ma è così. Possiamo anche immaginare un mondo nel quale un elettrone perda il 12% della sua carica elettrica in una collisione molto dura o in una partita di poker; ma non è questo mondo. L'elettrone, il protone, il pione positivo e le altre particelle hanno sempre una carica uguale a 1.

Perciò, quando Serber tirò fuori questa idea di particelle con una carica di un terzo dell'unità, gli dissero di dimenticarsela. Non s'erano mai viste cose del genere, e con il tempo il fatto, abbastanza curioso, che tutte le cariche osservate fossero multipli interi di un'unità standard immutabile era diventato intuitivo per i fisici. Di fatto si utilizzava questa «quantizzazione» della carica elettrica per andare in cerca di una simmetria più profonda, che la spiegasse. Comunque, Gell-Mann riesaminò e propose l'ipotesi dei quark e contemporaneamente la rese più confusa, o così parve ad alcuni di noi, supponendo che questi quark non fossero oggetti reali, ma utili costruzioni matematiche.

Oggi i tre quark nati nel 1964 portano i nomi di «su», «giù» e «strano», o **u**, **d** e **s**;* naturalmente ci sono anche i tre antiquark $\bar{\mathbf{u}}$, $\bar{\mathbf{d}}$ e $\bar{\mathbf{s}}$. Si sono dovute scegliere le loro proprietà con molta attenzione, in modo da poterle usare per costruire tutti gli adroni conosciuti. Al quark **u** si assegna una carica di + 2/3, mentre il **d** ha – 1/3, come **s**; gli antiquark hanno cariche uguali, ma opposte. Anche gli altri numeri quantici sono scelti in modo da dare la somma corretta. Il protone, per esempio, è fatto di tre quark – **uud** – con cariche di + 2/3, + 2/3 e – 1/3 la cui somma è + 1, il che corrisponde a ciò che sappiamo di esso; il neutrone è invece una combinazione **udd**, con cariche + 2/3, – 1/3 e – 1/3 e somma 0, e anche questo ha senso perché il neutrone, come indica il suo nome, ha carica zero.

Tutti gli adroni, in base a questo modello, sono formati da quark, a volte tre e a volte due. Esistono due classi di adroni, i barioni e i mesoni: i barioni, imparentati con i protoni e i neutroni, sono sistemi a tre quark; i mesoni, che comprendono i pioni e i kaoni, sono formati da due quark, o meglio da un quark combinato con un antiquark. Prendiamo per esempio il pione positivo, che è $\mathbf{u\bar{d}}$: ha carica + 2/3 + 1/3, cioè 1 (ricordiamo che il $\bar{\mathbf{d}}$, o antiquark «giù», ha carica + 1/3).

L'ipotesi iniziale fu costruita in modo che i numeri quantici dei quark e le proprietà come lo spin, la carica, l'isospin e via dicendo

* Dalle iniziali di *up*, *down* e *strange*, i termini inglesi per «su», «giù» e «strano». (*NdT*)

rendessero conto solo di un piccolo numero di barioni (il protone, il neutrone, la particella lambda e simili) e mesoni; solo dopo si scoprì che questi numeri, e altre combinazioni pertinenti, corrispondevano a tutti gli adroni conosciuti, che erano centinaia. Funzionava! E tutte le proprietà di un composto, per esempio di un protone, erano sussunte sotto quelle dei quark che lo costituivano, con la precisazione che questi ultimi interagiscono intimamente l'uno con l'altro. O perlomeno questa è l'idea di base, e la sua realizzazione sarà il compito di diverse generazioni di teorici e computer, naturalmente a patto che vengano loro forniti i dati.

Le combinazioni fra quark pongono un problema interessante. Gli esseri umani hanno la caratteristica di modificare il proprio comportamento quando sono in compagnia; ma i quark, come vedremo, non restano mai soli e pertanto le loro proprietà autentiche, non modificate, possono soltanto essere *dedotte* dall'insieme delle condizioni nelle quali li osserviamo. Ma ecco alcune tipiche combinazioni di quark, con gli adroni che producono:

BARIONI	MESONI
uud protone	$\mathbf{u\bar{d}}$ pione positivo
udd neutrone	$\mathbf{d\bar{u}}$ pione negativo
uds lambda	$\mathbf{u\bar{u}}$ + $\mathbf{d\bar{d}}$ pione neutro
uus sigma più	$\mathbf{u\bar{s}}$ kaone positivo
dds sigma meno	$\mathbf{s\bar{u}}$ kaone negativo
uds sigma zero	$\mathbf{d\bar{s}}$ kaone neutro
dss csi meno	$\mathbf{\bar{d}s}$ antikaone neutro
uss csi zero	

I fisici si sono esaltati per lo spettacolare successo rappresentato dalla riduzione di centinaia di oggetti, apparentemente fondamentali, a combinazioni di tre sole varietà di quark (il termine «assi» è caduto in disuso: nessuno può competere con Gell-Mann quando si tratta di inventare dei nomi). La prova della bontà di una teoria sta nella sua capacità di predizione, e da questo punto di vista l'ipotesi dei quark, con o senza cautele, ha rappresentato un brillante successo. Fra le particelle già scoperte, per esempio, non c'era **sss**, l'unione di tre quark «strani», ma questo non ci impedì di dare un nome (omega meno, Ω^-) a tale combinazione. Poiché le particelle contenenti un quark «strano» avevano proprietà ben determinate, anche

quelle di un adrone **sss** con tre quark «strani» erano prevedibili; omega meno era una particella molto strana, con una sigla spettacolare, e nel 1964 venne scoperta nella camera a bolle di Brookhaven. Corrispondeva esattamente alle prescrizioni del dottor Gell-Mann.

Non che ogni problema fosse risolto, tutt'altro. C'era una quantità di domande ancora senza risposta; la prima era: «Come fanno i quark a restare attaccati?». Nei trent'anni successivi l'interazione forte che li tiene insieme sarebbe stata oggetto di migliaia di articoli, teorici e sperimentali, e una teoria dal nome-scioglilingua di «cromodinamica quantistica» avrebbe proposto una nuova razza di particelle messaggere, i gluoni,* per incollare i quark (!!) l'uno all'altro. Ma ogni cosa a suo tempo.

Le leggi di conservazione

Nella fisica classica ci sono tre grandi leggi di conservazione, dell'energia, del momento lineare e del momento angolare; è stato dimostrato, come vedremo nel capitolo VIII, che esiste una profonda correlazione fra queste leggi e i concetti di spazio e tempo. La teoria quantistica ha introdotto molte altre quantità che si conservano, cioè non sono modificate da un'ampia varietà di processi subnucleari, nucleari e atomici: per esempio la carica elettrica, la parità e molte proprietà del tutto nuove, come l'isospin, la stranezza, il numero barionico e il numero leptonico. Sappiamo già che le forze esistenti in natura non rispettano tutte queste leggi di conservazione allo stesso modo: la parità, per esempio, è rispettata dalle interazioni forti ed elettromagnetiche ma non da quelle deboli.

Per verificare una legge di conservazione si esamina un numero molto grande di reazioni nelle quali è possibile controllare una certa proprietà, per esempio la carica elettrica, sia prima sia dopo. Si ricorderà che la conservazione dell'energia e quella del momento erano così ben confermate che, quando si scoprirono dei processi che in apparenza le violavano, venne postulato il neutrino per salvarle, e fu un'idea giusta. Anche l'inesistenza di certe reazioni può essere indizio di una legge di conservazione; un elettrone, per esempio, non decade in due neutrini perché ciò violerebbe la conservazione della carica. Un altro esempio è quello del decadimento del protone, che, come si ricorderà, non c'è. Ai protoni viene assegnato un numero

* L'etimologia di «gluone» è connessa con l'inglese *glue*, «colla», e richiama la proprietà coesiva di questa particella, ritenuta responsabile delle interazioni forti fra quark. (*NdT*)

barionico che deriva, in ultima analisi, dalla loro struttura a tre quark; e infatti protoni, neutroni, lambda, sigma e così via – tutti a tre quark – hanno numero barionico + 1, mentre le loro antiparticelle hanno il numero – 1 e i mesoni, i vettori di interazioni e i leptoni hanno tutti il numero 0. Se il numero barionico si conserva perfettamente, il barione più leggero, che è il protone, non potrà mai decadere perché tutti i possibili prodotti di questo decadimento sono più leggeri e il loro numero barionico è 0 (naturalmente una collisione protone-antiprotone ha proprio il numero 0 e può dare origine a qualsiasi cosa). Perciò il numero barionico «spiega» la stabilità del protone: il neutrone, che decade in protone, elettrone e antineutrino, e il protone interno al nucleo, che può decadere in neutrone, positrone e neutrino, lo conservano.

Povero ragazzo, che vive in eterno! Il protone non può decadere in pioni perché così violerebbe la conservazione del numero barionico; non può decadere in neutrone, positrone e neutrino per via della conservazione dell'energia; non può decadere in neutrini o fotoni per via della conservazione della carica. E ci sono anche altre leggi di conservazione, e vediamo chiaramente che sono queste leggi a dare forma al mondo. Se il protone potesse decadere, la nostra esistenza – come dovrebbe risultarci ovvio – sarebbe minacciata, ma la minaccia dipenderebbe, naturalmente, dalla vita media del protone stesso. Dato che l'universo ha un'età di circa quindici miliardi di anni, una vita media *molto* più lunga di questo intervallo non influirebbe troppo sul fato della Repubblica.

Le teorie più recenti del campo unificato, tuttavia, prevedono sì una conservazione del numero barionico, ma non *rigorosa*, e questa previsione ha stimolato uno sforzo davvero imponente, ma finora senza successo, volto a scoprire un decadimento protonico. Quella che viene esemplificata è l'esistenza di leggi di conservazione *approssimata*, come nel caso della parità. La stranezza era stata escogitata per spiegare come mai diversi barioni vivessero molto più a lungo di quanto avrebbero dovuto, dati tutti i possibili stati finali nei quali potevano decadere; solo in seguito si comprese che questa proprietà, in una particella – per esempio nella lambda o nel kaone – indicava la presenza di un quark **s**. La lambda e il kaone, però, decadono, e nel corso di questo processo il quark **s** si trasforma in un quark **d**, più leggero. Perché ciò accada, tuttavia, è necessaria un'interazione debole (quella forte non ha a che fare con i processi **s** → **d**; in altri termini, l'interazione forte conserva la stranezza). Ora, l'interazione debole è, appunto, debole; di conseguenza il decadimento

della lambda, del kaone e degli altri membri della stessa famiglia è lento e quindi la loro vita media è lunga... 10^{-10} secondi invece dei 10^{-23} impiegati, normalmente, da questi processi.

È una fortuna che ci siano tutte queste pezze d'appoggio sperimentali per le leggi di conservazione, perché un importante teorema matematico ha dimostrato che tali leggi sono collegate a simmetrie rispettate dalla natura (e il nome del nostro gioco, da Talete a Sheldon Glashow, è proprio «simmetria»). È stata una matematica, Emmy Noether, a scoprire questo collegamento intorno al 1920.

Ma torniamo alla nostra storia.

Le palle di niobio

Nonostante l'omega meno e altri successi, nessuno aveva mai visto un quark; intendo nel senso dei fisici, non in quello della «signora del pubblico molto scettica». Zweig ha sempre sostenuto, fin dall'inizio, che gli assi o quark erano entità reali; ma John Peoples, oggi direttore del Fermilab, quando era un giovane sperimentatore in cerca di quark si sentì dire da Gell-Mann di non preoccuparsi, perché tanto erano solo «un trucco per far tornare i conti».

Dire una cosa del genere a uno sperimentatore è come lanciargli il guanto di sfida, e un po' dappertutto partì la ricerca dei quark. Quando si affigge un cartello con la scritta «ricercato», naturalmente saltano fuori delle false segnalazioni; e la gente andò a frugare i raggi cosmici, i sedimenti oceanici di profondità, il vino vecchio e di qualità («Qui non ci sciono quark, hic!»). Per cercare di far uscire i quark di prigione si ricorse a tutti gli acceleratori; una carica di 1/3 o 2/3 sarebbe stata relativamente facile da trovare, ma quasi tutte le ricerche si conclusero con un nulla di fatto. Solo uno sperimentatore dell'Università di Stanford riferì di avere intrappolato un quark usando delle minuscole sfere di niobio puro, lavorate con molta precisione; ma non si riuscì a ripetere l'esperimento, che quindi fu screditato, e alcune matricole senza rispetto indossarono delle T-shirt con la scritta «Devi avere palle di niobio per mettere i quark in trappola».

I quark erano inafferrabili; così l'impossibilità di trovarli allo stato libero e l'ambivalenza del concetto originario ritardarono l'accettazione di questa nozione fino ai tardi anni Sessanta, quando nuovi esperimenti, di tipo diverso, resero indispensabili proprio i quark, o almeno qualcosa di simile. Erano stati inventati per spiegare l'esistenza e la tassonomia di un numero enorme di adroni: ma se un

protone ne aveva tre, perché non si facevano vedere? La verità è che ce li eravamo lasciati scappare: si possono «vedere». E siamo di nuovo a Rutherford.

Il ritorno di «Rutherford»

Nel 1967 lo SLAC avviò una serie di esperimenti sulla dispersione in cui si usavano nuovi fasci di elettroni. L'obiettivo era quello di studiare più a fondo la struttura del protone. L'elettrone ad alta energia entra e urta il protone dell'idrogeno-bersaglio, dopodiché fuoriesce un elettrone con un'energia molto inferiore e un percorso fortemente angolato rispetto a quello iniziale. Le strutture puntiformi all'interno del protone si comportano, in un certo senso, come il nucleo rispetto alle particelle alfa di Rutherford; ma qui il problema era più sottile.

Il gruppo di Stanford, diretto dal fisico dello SLAC Richard Taylor (un canadese) e dai due fisici del MIT Jerome Friedman e Henry Kendall, fu enormemente aiutato dalla rielaborazione teorica di Richard Feynman e James Bjorken. Feynman dedicava da tempo la sua energia e fantasia alle interazioni forti, e in particolare al problema «Che cosa c'è dentro il protone?»; dalla sua base, al Cal Tech di Pasadena, andava spesso a far visita a Stanford. Bjorken, che tutti chiamano Bj, era un teorico di Stanford molto interessato al processo sperimentale e alle regole che dovevano stare alla base di certi dati apparentemente molto grezzi; secondo lui tali regole ci avrebbero indicato le leggi fondamentali (interne alla scatola nera) che controllano la struttura degli adroni.

Ma qui dobbiamo tornare ai nostri buoni amici Democrito e Boscovich, che ci aiutano entrambi a illuminare il soggetto. Per Democrito la prova dell'a-tomo è l'indivisibilità; ora, nel modello a quark il protone, in realtà, è un agglomerato colloso di tre quark in rapido movimento, ma poiché questi quark sono sempre legati inestricabilmente l'uno all'altro, sul piano sperimentale ci appare indivisibile. Boscovich aggiunse un secondo criterio di controllo: una particella elementare, o a-tomo, deve essere puntiforme; e il protone, decisamente, non supera questa prova. Il gruppo MIT-SLAC, assistito da Feynman e Bj, riuscì a rendersi conto che in questo caso il criterio operativo era il «punto», non l'indivisibilità; ma la traduzione dei dati in un modello con costituenti puntiformi richiedeva una sottigliezza molto superiore a quella necessaria per l'esperimento di Rutherford, e per questo era così conveniente tenersi nel gruppo due dei migliori teorici del

mondo. Il risultato fu che i dati, effettivamente, indicavano che nel protone c'erano degli oggetti puntiformi in movimento, e nel 1990 Taylor, Friedman e Kendall ottennero il premio Nobel per avere dimostrato la realtà dei quark (sono loro gli scienziati di cui parla Jay Leno, nella citazione all'inizio del capitolo).

Qui c'è una bella domanda: come fanno questi tipi a vedere dei quark, se i quark non sono mai allo stato libero? Immaginate una scatola chiusa con dentro tre biglie d'acciaio; uno la scuote, la inclina in tutti i sensi, ascolta e conclude: «Tre biglie». C'è però un punto più sottile: un quark viene sempre rivelato nelle vicinanze di altri quark, e questo può alterarne le proprietà. È un fattore da tenere in considerazione, ma... *piano, piano.**

La teoria dei quark faceva sempre più adepti, soprattutto perché i teorici che esaminavano i dati cominciavano a immettere sempre più realtà nei quark stessi, aggiungendo nuove proprietà e trasformando in virtù l'incapacità di vederli allo stato libero. La parola che si sentiva ripetere un po' ovunque era «confinamento»: i quark sono confinati in perpetuo perché l'energia indispensabile per separarli *aumenta* all'aumentare della distanza fra di essi, finché, se proprio insistiamo a fondo, diventa sufficiente a creare una coppia quark-antiquark, e a quel punto abbiamo quattro quark, ovvero due mesoni. È come cercare di staccare un estremo da uno spago: si tira finché c'è uno schiocco, e – oplà – ecco due spaghi!

La lettura della struttura dei quark a partire dagli esperimenti sulla dispersione degli elettroni era in gran parte un monopolio della costa occidentale; devo ricordare però che contemporaneamente il mio gruppo raccoglieva dati molto simili a Brookhaven. Ho detto spesso, scherzando, che se Bjorken fosse stato un teorico della costa orientale i quark li avrei scoperti *io*.

I due esperimenti contrapposti dello SLAC e di Brookhaven dimostravano che c'è più di un modo di mettere a nudo un quark. La particella-bersaglio era un protone in entrambi i casi; ma Taylor, Friedman e Kendall usavano come sonde degli elettroni, mentre noi usavamo dei protoni. Allo SLAC mandavano le loro sonde nella «scatola nera della regione di collisione», dopodiché misuravano gli elettroni in uscita. C'erano anche molte altre cose che uscivano, per esempio protoni e pioni, ma venivano ignorate. A Brookhaven invece sparavamo i protoni su dei nuclei di uranio (in cerca dei loro protoni interni) e poi ci concentravamo sulle coppie di muoni in

* In italiano nell'originale. (*NdT*)

uscita, misurandole accuratamente (per quelli di voi che non sono stati attenti: sia gli elettroni sia i muoni sono leptoni e, a parte il fatto che il muone pesa circa duecento volte di più, hanno proprietà identiche).

Ho già detto che l'esperimento dello SLAC somigliava a quello di Rutherford sulla dispersione, che rivelò l'esistenza del nucleo. Rutherford però si era limitato a far rimbalzare delle particelle alfa dal nucleo e a misurare gli angoli; allo SLAC il processo era più complicato. Detto nel linguaggio del teorico, e usando l'immagine mentale evocata dalla matematica: nella macchina dello SLAC l'elettrone in entrata manda un fotone messaggero alla scatola nera, e se il fotone ha le proprietà richieste può essere assorbito da uno dei quark. Ora, quando l'elettrone emette un fotone messaggero che ha successo (cioè viene mangiato) la sua energia e il suo moto cambiano, dopodiché lascia la regione della scatola nera e viene a sua volta misurato. In altre parole, l'energia dell'elettrone in uscita ci dice qualcosa del fotone messaggero che ha emesso e – il che è più importante – di ciò che l'ha ingoiato. Ma c'è un'unica interpretazione possibile dello schema cui ubbidiscono i fotoni messaggeri: sono assorbiti da una sottostruttura puntiforme interna al protone.

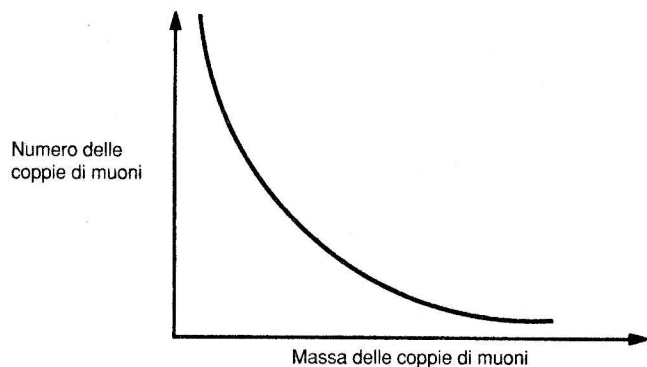
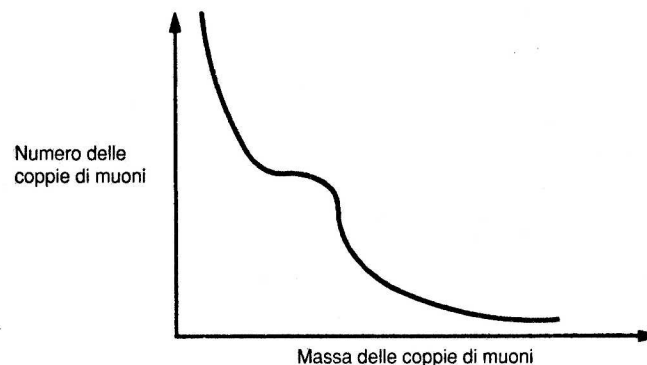
Nell'«esperimento del dimuone» di Brookhaven, così chiamato perché produce due muoni, mandiamo dei protoni ad alta energia nella regione della scatola nera; l'energia del protone stimola la scatola, che emette un fotone messaggero, ma prima di uscirne tale fotone si converte in un muone e nel suo antimuone, e sono queste particelle a lasciare la scatola e a essere misurate. Tutto ciò ci insegna qualcosa – come l'esperimento dello SLAC – sulle proprietà del fotone messaggero. Sul piano teorico, tuttavia, l'esperimento della coppia di muoni è stato capito solo nel 1972 e anzi sono state necessarie molte altre prove, assai sottili, prima che se ne potesse dare un'interpretazione univoca.

I primi a fornire questa interpretazione furono – e non sorprende – Sidney Drell e il suo allievo Tung Mo Yan di Stanford, dove la gente ha i quark nel sangue; i due giunsero alla conclusione che il fotone che genera la coppia di muoni è generato, a sua volta, quando un quark del protone in entrata collide con un antiquark del bersaglio (o viceversa), e i due vengono annichilati. La cosa è generalmente nota come esperimento di Drell-Yan, anche se siamo stati noi a inventarlo e Drell ha «soltanto» trovato il modello giusto.

Quando, in un suo libro, Richard Feynman (che sicuramente scherzava) chiamò «esperimento di Drell-Yan» il mio esperimento

del dimuone, telefonai a Drell e gli dissi di chiamare tutti coloro che avevano comprato il libro per pregarli di cancellare Drell-Yan a pagina 47 e di sostituirvi Lederman. Non osai importunare Feynman; ma Drell acconsentì di buon grado, e la giustizia trionfò.

Da allora, tutti i laboratori hanno fatto esperimenti di Drell-Yan-Lederman, fornendo dati, fra loro complementari, che confermano punto per punto il modo in cui i quark formano protoni e mesoni. Tuttavia gli studi dello SLAC e di Drell-Yan-Lederman non convertirono tutti i fisici alla fede nei quark; restava ancora un certo scetticismo. A Brookhaven avevamo davanti agli occhi un indizio che ci avrebbe permesso di rispondere agli scettici, se avessimo saputo che cosa significava.

Nell'esperimento del 1968 – il primo del suo genere – esaminavamo la graduale diminuzione della produzione di coppie di muoni al crescere della massa dei fotoni messaggeri. Un fotone messaggero può avere una massa transitoria di qualsiasi valore, ma più questa è elevata più breve è la sua vita, e più è difficile generarlo; di nuovo Heisenberg. Ricordiamo che più la massa è elevata minore è la regione spaziale che si sta esplorando, pertanto al crescere dell'energia dovremmo vedere un numero sempre più piccolo di eventi (coppie di muoni). Possiamo fare un grafico di questa correlazione; nella parte bassa, lungo l'asse x, abbiamo le masse, mentre lungo l'asse verticale y abbiamo le coppie di muoni. Dovremmo ottenere, dunque, un grafico più o meno così:

Si dovrebbe vedere una linea che scende in modo regolare, indicando che all'aumentare dell'energia dei fotoni che escono dalla scatola nera le coppie di muoni continuano a diminuire. Ottenemmo invece questo tipo di tracciato:

A una massa di circa 3 GeV il decremento regolare era interrotto da una «spalla» che oggi ha il nome di «spalla di Lederman». Questa spalla o protuberanza del grafico indicava un evento inaspettato, qualcosa che non si poteva spiegare con i soli fotoni messaggeri ed era un sovrappiù rispetto ai fenomeni di Drell-Yan. Non ne parlammo come di una nuova particella; fu il primo caso in cui, chiaramente, venne mancata una scoperta che avrebbe stabilito in modo definitivo la realtà dell'ipotesi dei quark.

Detto *en passant*: il nostro sconforto per esserci lasciati sfuggire la scoperta di strutture puntiformi dentro il protone – assegnata, per decreto svedese, a Friedman, Kendall e Taylor – è una finzione. Forse nemmeno Bjorken, nel 1968, avrebbe distinto tutte le sottigliezze della correlazione fra i dimuoni di Brookhaven e i quark. Retrospettivamente, l'esperimento dei dimuoni è il mio favorito: la concezione era originale e piena di fantasia, mentre la tecnica era semplice, anzi infantile (talmente semplice che mancai la scoperta di quegli anni). I dati avevano tre componenti – la prova dell'esistenza di strutture puntiformi, dovuta a Drell-Yan, la prova del concetto di «colore» con i suoi tempi assoluti (discusso più avanti) e la scoperta del J/psi (a portata di mano) – e ognuna delle tre era da premio Nobel. La Reale Accademia svedese delle scienze avrebbe risparmiato almeno due premi, se avessimo fatto le cose per bene!

La rivoluzione di novembre

Nel 1972 e 1973 iniziarono due esperimenti che avrebbero cambiato la fisica. Uno ebbe luogo a Brookhaven, in un vecchio campo militare fra i pini stenti e la sabbia, ad appena dieci minuti da alcune delle più belle spiagge del mondo sulla costa sud di Long Island,

dove si posano i cavalloni dell'Atlantico che arrivano direttamente da Parigi. Il luogo dell'altro era lo SLAC, sulle colline scure che sovrastano il campus spagnolesco dell'Università di Stanford. Entrambi gli esperimenti erano delle partite di pesca; nessuno dei due aveva motivazioni molto nette, ma nel novembre del 1974 si sarebbero incontrati con un fracasso che si fece sentire in tutto il mondo. Nella storia della fisica i fatti di fine 1974 sono noti come «rivoluzione di novembre»; se ne parla davanti al caminetto, dovunque ci siano dei fisici che si incontrano per rievocare tempi andati e grandi eroi e per sorseggiare Perrier. La preistoria, qui, è la convinzione quasi religiosa dei teorici che la natura debba essere bella e simmetrica.

Innanzitutto bisogna ricordare che l'ipotesi dei quark non metteva in pericolo lo statuto di particella elementare, o a-tomo, dell'elettrone. C'erano due classi di a-tomi puntiformi, i quark e i leptoni; l'elettrone è un leptone, come il muone e il neutrino. E fin qui tutto bene; ma Schwartz, Steinberger e Lederman avevano rovinato la simmetria con l'esperimento dei due neutrini, e ora c'erano quattro leptoni (elettrone, neutrino elettronico, muone e neutrino muonico) ma tre quark («su», «giù» e «strano»). Nel 1972 un diagramma scritto nella stenografia della fisica avrebbe avuto, più o meno, questo aspetto:

quark:	**u d s**	
leptoni:	e	μ
	ν_e	ν_μ

Bruttissimo! Ma nessuno avrebbe fatto un diagramma così, perché non aveva senso. I leptoni avevano una bella disposizione a coppie ma il settore dei quark era molto brutto, con quella tripletta (all'epoca i teorici erano già delusi dal numero 3).

Già nel 1964 due teorici, Sheldon Glashow e Bjorken, avevano osservato, sostanzialmente, che sarebbe stata una cosa veramente affascinante se i quark fossero stati quattro; così si sarebbe reintegrata la simmetria fra quark e leptoni distrutta dalla nostra scoperta del quarto leptone, il neutrino muonico. Nel 1970 un argomento, complicato ma elegantissimo, di Glashow e dei suoi collaboratori fornì una ragione teorica più cogente per sospettare che dovesse esistere un quarto quark, e da allora Glashow divenne un fervente partigiano dei quark. Shelly – così lo conoscono gli ammiratori e i nemici – ha scritto diversi libri che dimostrano quanto possa esserne appassionato; oltre a essere uno dei principali architetti del modello standard è anche molto apprezzato per le storielle che racconta, i sigari che offre e le sue osservazioni critiche sulle varie tendenze teoriche.

Glashow divenne un attivissimo piazzista dell'invenzione teorica di un quarto quark che, com'è noto, chiamò «incantato». Teneva seminari, conferenze, gruppi di lavoro nei quali esortava gli sperimentatori a cercare un quark «incantato». La sua idea era che questo nuovo quark, insieme a una nuova simmetria nella quale anche i quark si sarebbero presentati a coppie – «su»-«giù» e «incantato»-«strano» –, avrebbe curato molte malattie (dottore, è qui che fa male) della teoria delle interazioni deboli; per esempio avrebbe permesso di cancellare certe reazioni che erano state previste, ma mai osservate. A poco a poco si conquistò, almeno fra i teorici, dei seguaci. Nell'estate del 1974 tre di questi, Mary Gaillard (una delle pochissime donne nella fisica e tra i migliori teorici esistenti, maschi o femmine), Ben Lee e Jon Rosner, scrissero un articolo di rivista, *La ricerca dell'incanto*, che avrebbe avuto un valore germinale; era un lavoro particolarmente istruttivo per gli sperimentali perché sottolineava che questo quark – chiamiamolo **c*** – e la sua antiparticella $\bar{\mathbf{c}}$ potevano essere creati nella scatola nera delle collisioni, emergendo poi come mesone neutro nel quale **c** e $\bar{\mathbf{c}}$ erano legati insieme. Gli autori supponevano addirittura che i vecchi dati di Brookhaven sulle coppie di muoni, rilevati dal mio gruppo, potessero indicare il decadimento di una coppia $\mathbf{c}\bar{\mathbf{c}}$ in due muoni e che la «spalla di Lederman» intorno ai 3 GeV si potesse interpretare così. In altre parole, 3 GeV era, presumibilmente, la massa di questa entità $\mathbf{c}\bar{\mathbf{c}}$.

Caccia alle protuberanze

Ma queste erano soltanto chiacchiere di teorici. Altre ricostruzioni (pubblicate) della «rivoluzione di novembre» lasciano capire che gli sperimentali, in un certo senso, sbavavano dalla voglia di verificare le idee dei teorici: balle. Stavano gettando le reti. Quelli di Brookhaven, poi, erano a caccia di protuberanze, di sfasature dei dati che potessero indicare una fisica nuova, di qualcosa per ribaltare la carrozza, non per riequilibrarla.

All'epoca in cui Glashow, la Gaillard e altri parlavano d'incanto anche la fisica sperimentale aveva i suoi problemi. Era ormai evidente che esisteva una concorrenza fra i collisori elettrone-positrone ($e^- e^+$) e gli acceleratori di protoni; fra i «tifosi» dei leptoni e quelli

* Iniziale di *charm*, «incanto». (*NdT*)

degli adroni era in corso un aspro dibattito. Con gli elettroni non si era concluso gran che: ma bisognava sentire la propaganda! Essendo considerati dei punti privi di struttura interna, gli elettroni ci offrono uno stato iniziale molto lineare: un e^- (elettrone) e un e^+ (positrone, l'antiparticella dell'elettrone) che si dirigono l'uno verso l'altro nel dominio di collisione della scatola nera. Lineare e semplice: e il modello sottolineava che qui il primo passo consiste nel fatto che la collisione particella-antiparticella genera un fotone messaggero la cui energia è uguale a quella della somma delle due particelle.

Ora, il fotone messaggero ha un'esistenza molto breve al cui termine si materializza in coppie di particelle con adeguati valori di massa, energia, spin e altri numeri quantici richiesti dalle leggi di conservazione; queste particelle escono dalla scatola nera e noi vediamo, in genere, (1) un'altra coppia $e^- e^+$ o (2) una coppia muone-antimuone o (3) adroni, in un'ampia varietà di combinazioni possibili ma vincolati dalle condizioni iniziali (l'energia e le proprietà quantiche del fotone messaggero). La varietà dei possibili stati finali, derivanti tutti da uno stato iniziale assai semplice, attesta la potenza della tecnica usata.

La collisione di due protoni è molto diversa. Ogni protone ha tre quark che interagiscono fortemente l'uno con l'altro; in altre parole, fra di loro c'è un rapido scambio di gluoni, che sono le particelle messaggere dell'interazione forte (incontreremo di nuovo i gluoni più avanti, sempre in questo capitolo). Non basta: per rendere ancora più complesso il nostro sgradevole protone, un gluone, mentre passa, poniamo, da un quark «su» a un quark «giù», può dimenticare momentaneamente la sua missione e materializzarsi (come il fotone messaggero) in un quark e un antiquark qualsiasi, per esempio **s** e $\bar{s}$. La comparsa di questo $s\bar{s}$ è molto fuggevole, dato che il gluone deve riapparire in tempo per farsi assorbire, ma intanto introduce un oggetto molto complicato.

I fisici che si erano abituati a usare gli acceleratori di elettroni chiamavano sprezzantemente «pattumiere» i protoni e paragonavano, non senza ragione, le collisioni protone-protone o protone-antiprotone a scontri fra due pattumiere dalle quali schizzano fuori gusci d'uovo, bucce di banana, fondi di caffè e biglietti di lotteria spiegazzati.

Nel 1973-74 il collisore elettrone-positrone ($e^- e^+$) di Stanford (il cosiddetto SPEAR) cominciò a raccogliere dati e trovò subito un risultato inesplicabile: la proporzione delle collisioni che producevano adroni era superiore alle previsioni teoriche. È una storia complicata e, fino all'ottobre 1974, non molto interessante; poi i fisici dello SLAC, guidati da Burton Richter che, secondo la gloriosa tradizione dei capigruppo, in quel momento era assente, cominciarono a stringere da vicino alcuni strani effetti che si manifestavano quando la somma delle energie delle due particelle collidenti si avvicinava a 3 GeV, una massa, come si ricorderà, che suggerisce molte idee.

La faccenda era resa più pepata dal fatto che cinquemila chilometri più a oriente, a Brookhaven, un gruppo del MIT stava ripetendo il nostro esperimento del 1967. Il direttore era C.C. Ting, che (si raccontava) era stato il capo di tutti i boy-scout di Taiwan, aveva preso il dottorato all'Università del Michigan, poi era andato per un periodo al CERN e nei primi anni Sessanta era entrato, come assistente, nel mio gruppo dell'Università della Columbia, dove gli avevamo limato gli spigoli.

Ting, uno sperimentatore meticoloso, metodico, preciso e ben organizzato, rimase con me per pochi anni, poi ne passò diversi altri, molto fruttuosi, in Germania, al laboratorio DESY nei pressi di Amburgo, e quindi diventò professore al MIT, dove si trasformò rapidamente in una forza (la quinta? o la sesta?) con cui fare i conti in fisica delle particelle. La mia lettera di raccomandazione sottolineava deliberatamente alcune delle sue carenze – è un vecchio trucco, quando si cerca di far assumere qualcuno – ma lo faceva per concludere che «Ting è un fisico cinese in salsa agrodolce». In effetti avevo con lui un conto in sospeso che risaliva a quando mio padre gestiva una piccola lavanderia e io, ancora bambino, sentivo raccontare un sacco di cose sulla concorrenza dei cinesi dall'altro lato della strada. Da allora i fisici cinesi mi hanno sempre innervosito.

Lavorando con l'acceleratore di elettroni del laboratorio DESY, Ting diventò un esperto nell'analizzare le coppie $e^+ e^-$ prodotte da collisioni fra elettroni, e pertanto decise che il miglior modo di eseguire l'esperimento del dileptone di Drell-Yan – pardon, di Ting – consisteva nel rilevare le coppie di elettroni; così nel 1974 venne a Brookhaven, dove, a differenza dei suoi colleghi dello SLAC che facevano scontrare elettroni e positroni, usava protoni ad alta energia che dirigeva contro un bersaglio stazionario, dopodiché osservava le coppie $e^+ e^-$ che uscivano dalla scatola nera con strumenti avanzatissimi, e in particolare con un rivelatore molto più preciso di quel rozzo congegno che avevamo messo insieme sette anni prima. Così riuscì a determinare con precisione, usando camere proporzionali a fili Charpak, la massa del fotone messaggero, o, in ogni caso, di ciò che produceva la coppia elettrone-positrone osservata. Dato che sia i muoni sia gli elettroni sono leptoni, la scelta del tipo di coppia da rilevare era una que-

stione di gusto. Ting andava a caccia di protuberanze, gettava le reti in cerca di nuovi fenomeni, ma non stava cercando di verificare una nuova ipotesi. A quanto raccontano, una volta disse: «Mi piace mangiare alla cinese insieme ai teorici, ma passare la vita a fare quello che ti dicono di fare è una perdita di tempo». Proprio la persona giusta per scoprire un quark chiamato «incantato».

Gli esperimenti di Brookhaven e dello SLAC erano destinati a fare la stessa scoperta, ma fino al 10 novembre 1974 nessuno dei due gruppi seppe molto sui progressi dell'altro. Perché c'è un nesso fra i due esperimenti? In quello dello SLAC un elettrone si scontra con un positrone creando, inizialmente, un fotone virtuale; quello di Brookhaven ha uno stato iniziale impuro, complicato, confuso, ma considera i fotoni virtuali solo se e quando emergono e si dissolvono in una coppia $e^+ e^-$. A quel punto entrambi si occupano del fotone messaggero, che può avere un'energia-massa transitoria qualsiasi, dipendente dalla forza della collisione. Il modello, ben confermato, della collisione dello SLAC dice che si crea un fotone messaggero che può dissolversi formando adroni, per esempio tre pioni, o un pione e due kaoni, o un protone, un antiprotone e due pioni, oppure una coppia di muoni o di elettroni, e così via. Esistono molte possibilità compatibili con i fattori in entrata (energia, momento, spin e altri).

Perciò, se esiste qualcosa di nuovo la cui massa sia inferiore alla somma delle energie dei due fasci collidenti, anche questo qualcosa può essere creato nella collisione. In effetti la nuova «cosa», se ha gli stessi numeri quantici (ben conosciuti) del fotone, può dominare la reazione quando la somma delle due energie è esattamente uguale alla sua massa. Ho sentito dire che una voce tenorile, se ha il tono e l'intensità giusti, può spezzare il vetro; le nuove particelle hanno origine in modo simile.

Nella variante di Brookhaven l'acceleratore invia dei protoni contro un bersaglio fisso, che in questo caso è un piccolo pezzo di berillio. Quando i protoni, relativamente grandi, urtano il nucleo di berillio, relativamente grande anch'esso, può accadere – e accade – di tutto: che un quark colpisca un quark, che un quark colpisca un antiquark, che un quark colpisca un gluone, che un gluone colpisca un gluone. E qualunque sia l'energia dell'acceleratore, hanno luogo collisioni a energie molto più basse, perché l'energia totale del protone è suddivisa fra i quark che lo costituiscono. Perciò quelle coppie di leptoni che Ting misurava per interpretare il suo esperimento uscivano dalla macchina in modo più o meno casuale. Il vantaggio di uno stato iniziale così complesso è che c'è una certa probabilità di

produrre tutto ciò che si può realizzare a quell'energia; le cose che succedono quando si scontrano due pattumiere sono davvero molte. Lo svantaggio è che bisogna cercare la nuova «cosa» in mezzo a un mucchio di materiali di scarto. Per dimostrare l'esistenza di una nuova particella c'è bisogno di far andare la macchina parecchie volte, o questa particella non si farà vedere in modo regolare. E c'è anche bisogno di un buon rivelatore, e Ting, per sua fortuna, ne aveva uno che era una meraviglia.

Lo SPEAR, la macchina dello SLAC, era l'opposto: faceva urtare elettroni con positroni. Una cosa molto semplice: particelle puntiformi, materia e antimateria, che collidevano annientandosi a vicenda. In questo caso la materia si trasforma in pura radiazione, ovvero in un fotone messaggero, che a sua volta si rapprende formando nuova materia. Se ciascuna delle particelle incidenti è, poniamo, di 1,5525 GeV, si ottiene ogni volta un valore doppio, cioè una collisione da 3,105 GeV; e se esiste una particella con tale massa, si può produrre questa particella invece di un fotone. Si è quasi costretti a scoprirla, la macchina non può fare altro (le collisioni che produce hanno un'energia predeterminata, e per passare a un'altra energia gli scienziati devono regolare in modo diverso i magneti e fare altre correzioni). I fisici di Stanford erano in grado di regolare finemente l'energia della macchina, con una precisione che superava di molto quella prevista dal progetto originale, il che sul piano tecnico era un'impresa davvero notevole (io, francamente, non l'avevo creduta possibile). Lo svantaggio di una macchina come lo SPEAR è che richiede una scansione del dominio energetico molto lenta, a passi piccolissimi; ma quando si trova l'energia giusta – o quando, in qualche modo, si è preavvertiti, e di questo problema si sarebbe parlato molto – si può scoprire una nuova particella nel giro di un giorno, o anche meno.

Torniamo per un momento a Brookhaven. Nel 1967-68, quando osservammo la strana spalla del dimuone, i nostri dati andavano da 1 a 6 GeV, e a 6 GeV le coppie di muoni erano solo un milionesimo di quante erano a 1 GeV; ma a 3 GeV la curva della produzione di coppie diventava improvvisamente orizzontale, e riprendeva a scendere solo a 3,5. C'era, in altre parole, un plateau, ovvero una spalla, fra 3 e 3,5 GeV. Nel 1969, mentre ci preparavamo a pubblicare i dati, cominciammo a discutere – eravamo in sette – sul modo in cui descrivere questa spalla. Era una nuova particella i cui effetti venivano parzialmente cancellati dal rivelatore, che produceva forti distorsioni? O si trattava di un nuovo processo, che creava fotoni messaggeri a un ritmo diverso? Nel 1969 nessuno sapeva come si

producessero le coppie di muoni, e io decisi che i dati non erano sufficienti a farci annunciare una scoperta.

E poi, l'11 novembre 1974, durante un drammatico confronto, venne fuori che sia lo SLAC sia Brookhaven avevano chiare indicazioni di un incremento a 3,105 GeV. Allo SLAC, quando la macchina fu sintonizzata su quell'energia (e non fu un lavoro da poco), i contatori che registravano le collisioni impazzirono, indicando un valore cento volte superiore al normale, salvo ricadere al livello base quando l'acceleratore era sintonizzato su 3,1 o 3,12 GeV. C'era voluto tanto tempo per trovare la risonanza proprio perché era così netta; il gruppo aveva già esplorato quella banda di energie, ma l'incremento gli era sfuggito. E nei dati raccolti da Ting a Brookhaven le coppie di leptoni in uscita, misurate con precisione, mostravano una marcata protuberanza il cui centro era prossimo a 3,1 GeV. Anche Ting concluse che quella protuberanza poteva avere un solo significato: che *lui* aveva scoperto un nuovo stato della materia.

Il problema della priorità scientifica nella scoperta di Brookhaven/SLAC era dei più spinosi. Chi era stato il *primo*? Giravano molte accuse e maldicenze. Una delle accuse era che gli scienziati dello SLAC sapevano dove andare a cercare perché conoscevano i risultati preliminari di Ting; la replica era che la protuberanza di Ting non permetteva di trarre delle conclusioni, e nelle ore trascorse fra l'annuncio di Ting e la scoperta dello SLAC le era stato fatto un bel massaggio. Quelli dello SLAC chiamarono ψ (psi) il nuovo oggetto, Ting lo chiamò J; oggi è universalmente noto come J/ψ, o J/psi. Nella comunità sono tornati – più o meno – l'armonia e l'amore.

Perché tanto rumore? (e un po' di uva acerba)

Tutto questo era molto interessante, ma perché quel baccano tremendo? La notizia dell'annuncio congiunto dell'11 novembre fece immediatamente il giro del mondo; uno scienziato del CERN ricorda: «Era una cosa incredibile. Nei corridoi tutti ne parlavano». Il «New York Times» della domenica mise la scoperta in prima pagina: TROVATA UNA PARTICELLA ATOMICA DI TIPO NUOVO E SORPRENDENTE. «Science» titolò: DUE NUOVE PARTICELLE RALLEGRANO I FISICI E LI RENDONO PERPLESSI; qualche tempo dopo, Walter Sullivan, il decano dei divulgatori scientifici, scrisse sul «New York Times»: «La fisica non è stata mai, o quasi mai, così in subbuglio... e non è finita». Appena due anni dopo, Ting e Richter si divisero, grazie al J/psi, il premio Nobel per la fisica.

La notizia mi arrivò mentre lavoravo sodo a un esperimento del Fermilab dal nome originale di E-70. Adesso che ne scrivo nel mio studio, diciassette anni dopo, posso ricordare i miei sentimenti? Come scienziato e fisico delle particelle provai una gioia immensa per questo passo avanti, anche se, naturalmente, era una gioia colorata di invidia e con un tocco, appena un tocco, di odio assassino per gli scopritori. È la reazione normale. Ma anch'io ero stato a Brookhaven: Ting stava eseguendo il mio esperimento, anche se le camere che avevano reso così preciso il suo non erano ancora disponibili nel 1967-68! E comunque il vecchio esperimento di Brookhaven aveva in sé gli ingredienti di due premi Nobel... Se avessimo avuto un rivelatore migliore, se Bjorken si fosse trovato all'Università della Columbia, se fossimo stati un po' più intelligenti... E se mia nonna avesse avuto le ruote, come si diceva una volta per canzonare quelli che usavano troppi «se», sarebbe stata un tram.

Posso prendermela solo con me stesso. Dopo avere individuato quella misteriosa protuberanza nel 1967, avevo deciso di approfondire la fisica dei dileptoni con le nuove macchine ad alta energia delle quali si cominciava a parlare. Il CERN aveva in programma l'inaugurazione di un collisore protone-protone – l'ISR, con un'energia effettiva venti volte superiore a quella di Brookhaven – nel 1971; così feci una proposta proprio al CERN, abbandonando il mio «uovo oggi». Ma non vidi il J/psi nemmeno quando il nuovo esperimento cominciò a fornire dei dati, nel 1972: stavolta a causa di un virulento sottofondo di pioni, del tutto imprevisti, e del nostro nuovissimo rivelatore di particelle a vetri piombati che, a nostra insaputa, veniva irradiato dalla nuova macchina. Quel sottofondo risultò poi, già di per sé, una scoperta: osservammo degli adroni con un forte momento trasverso, cioè un nuovo tipo di dato che segnalava l'esistenza di una struttura a quark dentro il protone.

Intanto, sempre nel 1971, il Fermilab si stava preparando ad avviare una macchina da 200 GeV, e io puntai anche su questa. L'esperimento iniziò nel 1973, e la mia scusa fu che... non eravamo mai veramente arrivati a fare quello che volevamo, perché distratti dagli strani dati che diversi gruppi avevano osservato nell'ambiente, nuovo di zecca, del Fermilab. Ma quei dati si rivelarono inconsistenti, e quando tornammo ai dileptoni la «rivoluzione di novembre» era già nei libri di storia. Così, non solo mi feci scappare il J a Brookhaven, ma me lo feci scappare anche con le due nuove macchine, battendo il record di inefficienza in fisica delle particelle.

Ma non ho ancora risposto a una domanda: che cosa c'era sotto di

tanto grosso? Il J/psi era un adrone, ma abbiamo scoperto centinaia di adroni: allora perché suonare la fanfara per uno in più, anche se ha un nome fantasioso come J/psi? Il motivo sta nella sua grande massa (pesa il triplo di un protone) e nella «precisione», meno di 0,05 MeV, di questa massa.

Che cosa significa precisione? Significa questo: una particella instabile non può avere una massa univoca e ben definita; è la relazione di indeterminazione di Heisenberg a escluderlo. Più la vita media è breve, più la distribuzione delle masse è ampia; è una relazione quantica. Quando parliamo di distribuzione delle masse intendiamo che una serie di misurazioni ci darà masse diverse, distribuite lungo una curva probabilistica a campana. Chiamiamo massa della particella il picco di questa curva, per esempio 3,105 GeV, ma la dispersione dei valori della massa è di fatto una misurazione della vita media della particella. Dato che l'indeterminazione si riflette sulle misurazioni, possiamo chiarirci meglio questo fatto osservando che se una particella è stabile abbiamo a disposizione un tempo infinito per misurarne la massa, perciò la dispersione sarà infinitamente piccola. La massa di una particella con una vita molto breve non può essere determinata con precisione, nemmeno in linea di principio, e i risultati sperimentali daranno, anche con un apparato raffinatissimo, una dispersione molto ampia delle sue misurazioni. Una tipica particella di interazione forte, per esempio, decade in 10^{-23} secondi e ha una dispersione di massa di circa 100 MeV.

C'è un altro punto da ricordare. Abbiamo già osservato che gli adroni, a parte il protone libero, sono tutti instabili. Più la massa di un adrone (o di una qualsiasi particella) è elevata più la sua vita media è breve, perché ci sono più cose nelle quali può decadere; senonché, a questo punto troviamo un J/psi con una massa enorme (nel 1974 era la particella più pesante mai scoperta), ma la distribuzione di questa massa – e il fatto è scioccante – è straordinariamente ristretta, mille volte più di quella di una normale particella di interazione forte. Il J/psi ha una vita media *lunga*: qualcosa gli impedisce di decadere.

L'incanto nudo

Che cos'è a impedirglielo?

E qui tutti i teorici alzarono la mano: è un nuovo numero quantico, oppure, ed equivalentemente, una nuova legge di conservazione. Che genere di conservazione? Che cos'è quel nuovo oggetto che si conserva? Ma le risposte, ahimè, per un certo tempo furono tutte diverse.

I dati continuavano ad affluire, a quel punto, però, solo dalle macchine $e^+ e^-$. A SPEAR si aggiunse ADONE, un collisore italiano, e più tardi un altro in Germania, DORIS. Fu scoperta un'altra protuberanza a 3,7 GeV; chiamiamola ψ' (psi primo). Non c'è bisogno di ricordare il J perché stavolta il bebè era tutto di Stanford: Ting e i suoi non erano più nel giro, perché il loro acceleratore era stato a malapena capace di scoprire la particella, ma non era in grado di approfondirne l'analisi. Comunque, nonostante gli sforzi più febbrili, inizialmente i tentativi di spiegare la sorprendente precisione del J/psi furono del tutto inconcludenti.

Ma finalmente fu trovata una congettura che cominciava ad avere senso. Forse il J/psi era l'«atomo», lungamente atteso, in cui erano legati insieme il **c** e il $\bar{\mathbf{c}}$, cioè il quark «incantato» e il suo antiquark; in altre parole poteva essere un mesone, cioè appartenere alla sottoclasse degli adroni formati da un quark e un antiquark. Glashow, preso dall'esultanza, lo chiamò «charmonium».* La teoria si dimostrò corretta, ma ci vollero altri due anni per verificare la congettura di base; era difficile, perché quando si combinano **c** e $\bar{\mathbf{c}}$ le proprietà intrinseche dell'incanto si elidono. Quelle indotte da **c** sono cancellate da $\bar{\mathbf{c}}$. I mesoni sono tutti formati da un quark e da un antiquark, ma non necessariamente da un quark con il suo antiquark specifico, come lo charmonium: un pione, per esempio, ha struttura $\mathbf{u}\bar{\mathbf{d}}$.

Era ormai aperta la caccia all'«incanto nudo», a un mesone che contenesse un quark «incantato» agganciato, per esempio, a un antiquark «giù». Quest'ultimo non avrebbe cancellato le fascinose proprietà del suo compagno, che sarebbe stato visibile in tutta la sua gloriosa nudità: la cosa migliore, a parte l'impossibile (cioè un quark «incantato» libero). Nel 1976 un gruppo SLAC-Berkeley diretto da Gerson Goldhaber scoprì un mesone di questo tipo – un $\mathbf{c}\bar{\mathbf{d}}$ – grazie al collisore $e^+ e^-$ di Stanford, e lo chiamò D^0 (D zero). Lo studio dei D avrebbe tenuto occupati gli acceleratori di elettroni per quindici anni, e oggi mesoni come il $\mathbf{c}\bar{\mathbf{d}}$, il $\mathbf{c}\bar{\mathbf{s}}$ e il $\mathbf{c}\bar{\mathbf{u}}$ sono farina per il mulino delle tesi di dottorato. Una complessa spettroscopia degli stati arricchisce ormai la nostra comprensione delle proprietà dei quark.

A quel punto, la precisione del J/psi era stata capita. L'incanto è un nuovo numero quantico, e le leggi di conservazione dell'interazione forte non permettono a un quark **c** di trasformarsi in uno di massa inferiore. Per questa trasformazione si devono invocare le in-

* Dall'inglese *charm*, «incanto». (*NdT*)

terazioni deboli ed elettromagnetiche, che agiscono assai più lentamente: di qui la lunga vita media e l'ampiezza molto limitata.

Le ultime difese contro l'idea di quark cedettero più o meno a quest'epoca; l'idea aveva portato a previsioni a largo raggio e queste previsioni erano state verificate. Probabilmente perfino Gell-Mann cominciò ad attribuire a questa idea degli aspetti reali, anche se il problema del confinamento (cioè l'impossibilità dell'esistenza di un quark libero) continuava a distinguere queste dalle altre particelle materiali. Una volta introdotto il quark «incantato», la tavola periodica si riequilibrava:

QUARK	
«su» (**u**)	«incantato» (**c**)
«giù» (**d**)	«strano» (**s**)
LEPTONI	
neutrino elettronico (ν_e)	neutrino muonico (ν_μ)
elettrone (e)	muone (μ)

Adesso c'erano quattro quark – o meglio quattro *sapori* di quark – e quattro leptoni, e potevamo parlare di due generazioni, disposte verticalmente nella tavola riportata sopra. La prima è **u**-**d**-ν_e-e; e poiché sono i quark «su» e «giù» a formare i protoni e i neutroni, questa prima generazione domina il nostro mondo. Osserviamo la seconda, **c**-**s**-ν_μ-μ, nel calore intenso ma effimero delle collisioni prodotte dagli acceleratori. Non possiamo ignorare queste particelle, per insolite che siano; ed essendo degli intrepidi esploratori, dobbiamo cercare di scoprire quale ruolo la natura abbia previsto per loro.

Non ho dato il giusto rilievo a quei teorici che previdero che il J/psi fosse lo charmonium e contribuirono a dimostrarlo; se lo SLAC era il cuore sperimentale, Harvard era il cervello teorico. Glashow e il suo compagno di classe al liceo scientifico del Bronx, Steve Weinberg, erano aiutati da una truppa di giovani effervescenti: ricorderò solo Helen Quinn, perché era immersa fino al collo nell'euforia dello charmonium e perché fa parte della mia squadra ideale.

La terza generazione

Fermiamoci e prendiamo le distanze. È sempre più difficile descrivere fatti recenti, specialmente quando chi li descrive vi è coinvolto. Non si può essere obiettivi, non c'è un filtro temporale sufficiente; tuttavia faremo un tentativo.

Eravamo ormai negli anni Settanta, e grazie allo straordinario potenziamento dei nuovi acceleratori e agli ingegnosi apparecchi di rilevazione che li accompagnavano il progresso verso la scoperta dell'a-tomo era molto rapido. Gli sperimentatori lavoravano in tutte le direzioni, imparavano sempre di più dei vari oggetti «incantati», esaminavano le interazioni da un punto di vista più microscopico, spingevano avanti la frontiera dell'energia, affrontavano i più importanti problemi del momento. Ma il ritmo del progresso subì una frenata quando divenne sempre più difficile trovare dei fondi. Il Vietnam, con il suo salasso dello spirito e del tesoro, lo shock petrolifero e il malessere generale produssero un allontanamento dalla ricerca fondamentale. I colleghi della «small science» ne furono danneggiati ancora più di noi; i fisici delle alte energie sono protetti, fino a un certo punto, dal fatto di mettere in comune le energie e le attrezzature in laboratori molto grandi.

Erano in piena fioritura invece i teorici, che costano poco (basta dar loro una matita, un po' di carta e una stanza) ed erano stimolati dal continuo afflusso di dati. Continuavamo a vedere gli stessi amici – Lee, Yang, Feynman, Gell-Mann, Glashow, Weinberg, Bjorken – ma presto se ne sarebbero aggiunti altri: per esempio Martinus Veltman, Gerard 't Hooft, Abdus Salam, Jeffrey Goldstone, Peter Higgs.

Ora parliamo brevemente delle principali scoperte sperimentali (favorendo così, senza molta giustizia, le «ardite incursioni nell'ignoto» rispetto all'«avanzata lenta e costante della frontiera»). Nel 1975 Martin Perl, lavorando quasi da solo e duellando alla d'Artagnan con i suoi colleghi e collaboratori, li convinse – e da ultimo convinse tutti – che nei dati dello SLAC si nascondeva un quinto leptone. È il cosiddetto tau (τ), che si presenta, come i suoi cugini più leggeri (l'elettrone e il muone), con due segni: τ^+ e τ^-.

Stavamo fabbricando una terza generazione. E poiché sia all'elettrone sia al muone è associato un neutrino, sembrava naturale assumere che esistesse un neutrino tauonico (ν_τ).

Al Fermilab, nel frattempo, il gruppo di Lederman aveva finalmente imparato a eseguire correttamente l'esperimento del dimuone, e una nuova organizzazione delle apparecchiature, molto più efficiente, rese accessibile tutto il ventaglio delle masse dal picco del J/psi, a 3,1 GeV, fino a quasi 25 GeV, cioè al limite consentito dall'energia di 400 GeV del Fermilab (ricordiamo che qui si parla di bersagli stazionari, per cui l'energia effettiva è solo una frazione di quella del fascio incidente). Ed eccole lì, a 9,4, 10 e 10,4 GeV: tre nuove protuberanze, chiare come Orione visto, in una notte limpida, dai

campi di sci di Cervinia. L'enorme massa dei dati moltiplicò per cento il catalogo mondiale dei muoni. La nuova particella, battezzata ypsilon (l'ultima lettera dell'alfabeto greco ancora disponibile, o così pensavamo), replicò la storia del J/psi; il nuovo oggetto che si conservava era il quark «bellezza», o, come dicono certi fisici di temperamento meno artistico, il quark «basso». La particella ypsilon era interpretata come un «atomo» formato da un nuovo quark **b**,* legato a un antiquark $\bar{\mathbf{b}}$; gli stati di massa più elevati erano semplicemente degli stati eccitati di questo nuovo «atomo». L'entusiasmo per la nuova scoperta non era nemmeno paragonabile a quello destato dal J/psi, ma in ogni caso la notizia di una terza generazione era davvero grossa e sollevava un ovvio problema: quante altre ce ne saranno? E perché la natura insiste a fare fotocopie, con ogni generazione che replica la precedente?

Descrivo brevemente il lavoro che ci portò all'ypsilon. Nel nostro gruppo di fisici dell'Università della Columbia, del Fermilab e di Stony Brook (Long Island) c'erano alcuni giovani sperimentatori molto in gamba. Avevamo costruito uno spettrometro aggiornatissimo, con camere proporzionali a fili, magneti, odoscopi a scintillazione, altre camere e altri magneti; il nostro sistema di acquisizione dei dati era *dernier cri* e si basava su un'elettronica progettata da un talento dell'ingegneria, William Sippach. Avevamo tutti lavorato con gli stessi tipi di fasci di particelle del Fermilab, conoscevamo i problemi e ci conoscevamo fra di noi.

John Yoh, Steve Herb, Walter Innes e Charles Brown erano quattro neodottori fra i migliori che io abbia mai conosciuto; il software che contava stava raggiungendo il livello di raffinatezza indispensabile per un lavoro di frontiera. Il problema, per noi, era che dovevamo percepire reazioni che si verificavano in appena una collisione su centomila miliardi; e poiché era necessario registrare molti di questi eventi dimuonici così rari, dovevamo rendere l'apparato insensibile a una proporzione colossale di particelle non pertinenti. Il nostro gruppo sapeva, meglio di chiunque altro, come lavorare in un ambiente altamente irradiato conservando dei rivelatori ancora capaci di sopravvivere; avevamo imparato a incorporare la ridondanza cosicché, per quanto fossero astuti i tentativi della natura di trarci in inganno, potevamo sopprimere spietatamente le informazioni false.

Avevamo cominciato da poco a imparare, quando incappammo nella modalità del dielettrone e ottenemmo circa venticinque coppie

* Iniziale sia di *beauty* («bellezza») sia di *bottom* («basso»). (*NdT*)

di elettroni al di sopra dei 4 GeV; stranamente, dodici di queste coppie erano ammassate intorno ai 6 GeV. Una protuberanza? Ne discutemmo e decidemmo di rendere nota la possibilità che esistesse una particella da 6 GeV. Sei mesi dopo, con dati più ampi, che coprivano trecento eventi, puf! niente protuberanza a 6 GeV. Avevamo proposto il nome ypsilon per questo bernoccolo fasullo, ma quando i nuovi dati, di qualità migliore, smentirono i precedenti, l'infortunio fu ribattezzato *oops-leon*.

E poi risistemammo l'intero impianto, investendo tutta la nostra esperienza in una ridisposizione di bersaglio, schermature, magneti e camere. I dati cominciarono ad arrivare nel maggio del 1977. L'epoca in cui ci volevano mesi per osservare ventisette eventi, o anche trecento, era finita; ora ne entravano migliaia alla settimana, ed erano, sostanzialmente, senza rumori di fondo. In fisica non accade spesso che un nuovo strumento permetta di osservare un campo altrettanto nuovo. Come esempi storici, e molto più significativi, abbiamo il primo microscopio e il primo telescopio, ma l'entusiasmo e la gioia della prima volta che furono usati non potevano essere molto più intensi dei nostri. Dopo una settimana, vicino ai 9,5 GeV apparve una grossa protuberanza, che in breve tempo fu ben confermata statisticamente. A dire il vero, John Yoh aveva già osservato un addensamento intorno ai 9,5 GeV nel vecchio esperimento dei trecento eventi, ma era rimasto scottato con i 6 GeV, e si limitò a battezzare «9,5» una bottiglia di champagne Mumm e a nasconderla nel nostro frigorifero comune.

In giugno bevemmo lo champagne e annunciammo la notizia (che comunque era già trapelata) a tutto il laboratorio; ne parlò Steve Herb, davanti a un pubblico fittissimo ed eccitato. Era la prima scoperta importante del Fermilab e prima che giugno finisse scrivemmo un articolo su quella grossa protuberanza a 9,5 GeV, con 770 eventi in corrispondenza del picco (quindi statisticamente sicura). Non che non avessimo passato ore-uomo interminabili (purtroppo non c'erano donne fra noi) a cercare una disfunzione del rivelatore che potesse simulare una simile protuberanza. Il rivelatore aveva delle zone morte? C'era per caso qualche smagliatura nel software? Andammo alla caccia, senza pietà, di dozzine di possibili errori; verificammo, una per una, le misure di sicurezza inserite nel programma, controllando la validità dei dati per mezzo di domande che dovevano avere risposte a noi già note. In agosto, grazie a nuovi dati e a un'analisi più sofisticata, avevamo tre picchi molto sottili, la famiglia degli ypsilon: ypsilon, ypsilon primo, ypsilon secondo. Non

c'era modo di spiegare questi dati con la fisica conosciuta nel 1977; fu così che entrò in scena la «bellezza» (o il «basso»).

Non ci furono molte resistenze alla nostra conclusione che quello che vedevamo era uno stato legato di un nuovo quark – chiamiamolo quark **b** – e della sua antiparticella gemella. Il J/psi era un mesone $\mathbf{c\bar{c}}$, l'ypsilon era un mesone $\mathbf{b\bar{b}}$. Ora, poiché la massa della protuberanza ypsilon era intorno ai 10 GeV, il quark **b** doveva avere una massa di circa 5 GeV: il quark più pesante mai osservato, dato che il quark **c** è di circa 1,5 GeV. Inoltre, «atomi» come $\mathbf{c\bar{c}}$ e $\mathbf{b\bar{b}}$ hanno uno stato fondamentale con energia più bassa e una molteplicità di stati eccitati, e i nostri tre picchi rappresentavano appunto lo stato fondamentale e due stati eccitati.

Una delle cose divertenti dell'ypsilon è che anche noi sperimentali riuscivamo a maneggiare le equazioni di questo strano atomo formato da un quark pesante che orbita intorno a un antiquark pesante. L'equazione del buon vecchio Schrödinger funzionava a meraviglia, e ci bastò un'occhiata ai nostri appunti da dottorandi per gareggiare con i teorici a chi calcolava prima i livelli energetici e le altre proprietà da noi misurate. Fu divertente... ma vinsero loro.

Le scoperte sono sempre delle esperienze quasi sessuali, e quando l'analisi improvvisata «pedalando» da John Yoh indicò per la prima volta l'esistenza della protuberanza, provai quell'intensa euforia che mi è familiare (oggi), velata però da una paura del tipo «troppo bello per essere vero». L'impulso più ovvio è quello di comunicare la cosa, di dirla alla gente. Ma a chi? Mogli, amici del cuore, figli, e in questo caso anche il direttore Bob Wilson, il cui laboratorio aveva un gran bisogno di una scoperta. Telefonammo ai colleghi di DORIS, in Germania, per chiedere se con il loro collisore $e^+ e^-$ riuscivano a raggiungere l'energia necessaria per fabbricare degli ypsilon; DORIS era l'unico acceleratore che avesse qualche possibilità di raggiungerla. In un tour de force di magia ingegneristica, i colleghi tedeschi ce la fecero: altra gioia (e sollievo, non piccolo). Ai ringraziamenti si pensa dopo. Basterà questo?

La scoperta fu resa traumatica da un incendio che interruppe la raccolta dei dati dopo una settimana di ottimo funzionamento. Nel maggio del 1977 un aggeggio che misurava la corrente nei nostri magneti (fornito, sicuramente, da uno che vendeva a prezzi stracciati) prese fuoco, e le fiamme si estesero ai fili. L'incendio di un impianto elettrico produce del gas di cloro, e quando arrivano i tuoi amici pompieri con gli idranti e buttano acqua dappertutto, si forma acido cloridrico, che si posa sui foglietti dei transistor e comincia lentamente a corroderli.

Il salvataggio elettronico è una forma d'arte. Alcuni amici del CERN mi avevano raccontato che anche loro avevano avuto un incendio di quel tipo, così telefonai per avere dei consigli e mi diedero il nome e i numeri di telefono di un esperto olandese che lavorava per una ditta tedesca e abitava nella Spagna centrale. L'incendio era scoppiato di sabato e ormai erano le tre del mattino di domenica; chiamai la Spagna dalla mia stanza al Fermilab e trovai il mio uomo. Sì, poteva venire; sarebbe stato a Chicago il martedì, e il mercoledì sarebbe arrivato dalla Germania un aereo da carico pieno di prodotti chimici speciali. Però aveva bisogno di un visto americano, e normalmente ci vogliono dieci giorni. Chiamai l'ambasciata americana a Madrid e blaterai: «Energia atomica, sicurezza nazionale, milioni di dollari in gioco...». Mi passarono un assistente dell'ambasciatore, che però non si fece impressionare finché non gli dissi di essere un professore dell'Università della Columbia: «Columbia! Perché non me l'ha detto prima? Io mi sono laureato nel cinquantasei» gridò. «Dica al suo uomo di chiedere di me.»

Il martedì il signor Jesse arrivò e annusò 900 foglietti, ognuno con circa 50 transistor (tecnologia del 1975); il mercoledì arrivarono i prodotti chimici. La dogana ci diede qualche altro dispiacere, ma fummo aiutati dal Dipartimento per l'energia. Il giovedì avevamo una linea di montaggio di fisici, segretarie, mogli e fidanzate, tutti che immergevano i foglietti nella soluzione segreta A, poi nella soluzione segreta B, poi li asciugavano con azoto puro, poi li spazzolavano con spazzole di pelo di cammello, poi li riponevano. Mi ero quasi aspettato che il rito dovesse essere accompagnato da un incantesimo olandese, basso e lamentoso, ma non fu necessario.

Jesse, che amava andare a cavallo, era andato ad abitare in Spagna per allenarsi con la cavalleria spagnola; quando seppe che avevo tre cavalli scappò via per cavalcare con mia moglie e il circolo ippico del Fermilab. Era un vero esperto, e dava consigli a tutti; in breve tempo i cavalieri della prateria cominciarono a scambiarsi informazioni sul cambio volante, il passaggio, la levata, la corvetta e la capriola. Adesso abbiamo una cavalleria del Fermilab bene addestrata e pronta a difendere il laboratorio se le forze nemiche dello SLAC o del CERN decidessero di attaccarci a cavallo.

Il venerdì installammo i foglietti controllandoli attentamente a uno a uno; il sabato mattina la macchina aveva ripreso ad andare, e pochi giorni dopo una rapida analisi dimostrò che la protuberanza c'era ancora. Jesse rimase per due settimane, andando a cavallo, riuscendo simpatico a tutti e dandoci consigli sulla prevenzione degli

incendi. Non ci mandò mai una parcella, però pagammo i prodotti chimici; e fu così che il mondo acquisì una terza generazione di quark e leptoni.

Lo stesso nome *bottom*, «basso», fa pensare che ci debba essere un quark *top*, «alto»; se invece preferite il nome *beauty*, «bellezza», allora c'è un quark *truth*, «verità». La nuova tavola periodica è fatta così:

Prima generazione	*Seconda generazione*	*Terza generazione*
	QUARK	
«su» (**u**)	«incantato» (**c**)	«alto»? (**t**)
«giù» (**d**)	«strano» (**s**)	«basso» (**b**)
	LEPTONI	
neutrino elettronico (ν_e)	neutrino muonico (ν_μ)	neutrino tauonico (ν_τ)
elettrone (e)	muone (μ)	tau (τ)

Mentre scrivo, il quark «alto» deve ancora essere trovato; neanche il neutrino tauonico è mai stato isolato sperimentalmente, ma nessuno dubita della sua esistenza. Nel corso degli anni sono state presentate al Fermilab varie proposte di «esperimento dei tre neutrini», una versione arricchita del nostro esperimento dei due neutrini, ma sono state tutte respinte perché il progetto sarebbe enormemente costoso.

È da notare che la realtà del gruppo in basso a sinistra (ν_e-e-ν_μ-μ) di questa tavola è stata stabilita nel 1962 dall'esperimento dei due neutrini. Il quark «basso» e il leptone tau hanno dato (quasi) l'ultimo tocco al modello nei tardi anni Settanta.

La tavola, una volta che ci aggiungiamo le varie interazioni, è un sommario in forma compatta di tutti i dati emersi da tutti gli acceleratori da quando Galileo lasciò cadere delle sfere di peso disuguale dalla Torre pendente; è detta *modello standard* o, in alternativa, immagine standard o teoria standard (imparare a memoria).

Nel 1993 questo modello è ancora il dogma che regna in fisica delle particelle. Le macchine degli anni Novanta, e in particolare il Tevatron del Fermilab e il collisore elettrone-positrone del CERN (il cosiddetto LEP), stanno concentrando gli sforzi di migliaia di sperimentatori sugli indizi che ci potrebbero portare a ciò che sta oltre il modello standard. Anche le macchine, più piccole, di DESY, Cornell, Brookhaven, SLAC e KEK (sul monte Tsukuba, in Giappone) stanno cercando di affinare la nostra conoscenza dei numerosi parametri di tale modello e di scoprire la chiave di una realtà più profonda.

Le cose da fare sono molte. Innanzitutto c'è da esplorare i quark:

ricordiamo che in natura ne esistono solo combinazioni di due tipi, (1) coppie quark-antiquark ($\mathbf{q\bar{q}}$), che sono i mesoni, e (2) triplette di quark (**qqq**), che sono i barioni. Oggi ci possiamo giocare, con queste combinazioni, componendo adroni come $\mathbf{u\bar{u}}$, $\mathbf{u\bar{c}}$, $\mathbf{u\bar{t}}$, $\mathbf{\bar{u}c}$, $\mathbf{\bar{u}t}$, $\mathbf{d\bar{s}}$, $\mathbf{d\bar{b}}$... e in più **uud**, **ccd**, **ttb**... Buon divertimento! Sono possibili centinaia di permutazioni (c'è anche chi sa esattamente quante): e sono tutte particelle o già scoperte ed elencate nelle tavole o pronte per esserlo. Misurando le masse, le vite medie e i modi di decadimento si imparano sempre più cose sull'interazione forte fra quark, mediata dai gluoni, e sulle proprietà dell'interazione debole. C'è davvero *molto* da fare.

Un altro punto sperimentale importante è quello delle cosiddette «correnti neutre», cruciale per la nostra storia della particella di Dio.

Ancora l'interazione debole

Negli anni Settanta erano ormai disponibili moltissimi dati sul decadimento degli adroni instabili, che in realtà è una manifestazione delle reazioni cui sono soggetti i quark che li compongono, per esempio del fatto che un quark «su» si trasforma in quark «giù», o viceversa. I risultati degli esperimenti sulla dispersione dei neutrini, in corso da decenni, erano ancora più istruttivi; e i vari dati, messi assieme, indicavano insistentemente che l'interazione debole doveva essere trasportata da tre particelle messaggere molto pesanti, W^+, W^- e Z^0. Dovevano essere massicce perché l'interazione debole ha una sfera d'influenza molto ridotta – non più di 10^{-19} metri, approssimativamente – e la meccanica quantistica ha una regola, sia pur grossolana, secondo la quale il raggio d'azione di una forza è inversamente proporzionale alla massa della particella messaggera. L'interazione elettromagnetica arriva all'infinito (anche se si indebolisce con la distanza) e la sua particella messaggera è il fotone, che ha massa zero.

Ma perché tre vettori dell'interazione? Perché tre particelle messaggere, una con carica positiva, una con carica negativa e una neutra, per propagare il campo che induce i cambiamenti di specie? Per spiegarlo dovremo fare un po' di contabilità fisica, assicurandoci che le cose che stanno ai due lati della freccia (→) siano uguali. Questo vale, in particolare, per i segni della carica elettrica; se per esempio una particella neutra decade in particelle cariche, le cariche positive devono elidere le negative.

Vediamo, per cominciare, che cosa succede quando un neutrone

decade in protone, che è un tipico processo di interazione debole. Scriviamo questa reazione così:

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

D'altronde abbiamo già visto che un neutrone decade in un protone, un elettrone e un antineutrino. Osserviamo che sul lato destro della reazione il protone, positivo, annulla la carica negativa dell'elettrone, mentre l'antineutrino è neutro: i conti tornano. Ma questa è una visione superficiale della reazione: è come guardare un uovo e vederne uscire una ghiandaia azzurra. Non abbiamo visto quello che faceva il feto all'interno. Ora, in realtà il neutrone è un conglomerato di tre quark, uno «su» e due «giù» (**udd**), mentre un protone è formato da due quark «su» e uno «giù» (**uud**); perciò quando un neutrone decade in protone un quark «giù» si converte in quark «su». Dunque è più istruttivo guardare dentro il neutrone e descrivere quello che succede ai quark, e nel linguaggio corrispondente la stessa reazione può essere scritta così:

$$\mathbf{d} \rightarrow \mathbf{u} + e^- + \bar{\nu}_e$$

In altre parole, dentro il neutrone un quark «giù» si trasforma in quark «su» emettendo un elettrone e un antineutrino. Anche questa, però, è una versione semplificata di ciò che accade realmente. L'elettrone e l'antineutrino non escono direttamente dal quark «giù»: c'è una reazione intermedia nella quale entra in gioco una particella W^-, per cui la teoria quantistica dell'interazione debole descrive il processo di decadimento del neutrone in due stadi, prima

$$1)\ \mathbf{d}^{-1/3} \rightarrow W^- + \mathbf{u}^{+2/3}$$

e poi

$$2)\ W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$

Osserviamo che prima il quark «giù» decade in una particella W^- e un quark «su», dopodiché W decade a sua volta in un elettrone e un antineutrino; W è il mediatore dell'interazione debole e partecipa alla reazione di decadimento. Nella reazione appena esaminata deve avere valore negativo per riequilibrare il cambiamento di carica elettrica prodotto dalla trasformazione di **d** in **u**; se aggiungiamo la carica di -1 di W^- alla carica di $+2/3$ del quark «su», otteniamo $-1/3$, cioè la carica del quark «giù» da cui è partita la reazione. I conti tornano.

Nei nuclei anche i quark «su» possono decadere in quark «giù», trasformando i protoni in neutroni. Nel linguaggio dei quark questo processo si descrive così: prima $\mathbf{u} \rightarrow W^+ + \mathbf{d}$ e poi $W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$. Qui abbiamo bisogno di un valore positivo di W per compensare il cambiamento di carica. Dunque i cambiamenti dei quark che osserviamo attraverso i cambiamenti dei neutroni in protoni e viceversa richiedono sia W^+ sia W^-. Ma c'è dell'altro.

Alcuni esperimenti condotti a metà degli anni Settanta per mezzo di fasci di neutrini avevano dimostrato l'esistenza di «correnti neutre» che richiedevano un vettore di forza pesante e neutro. Tali esperimenti erano stati ispirati da Glashow e altri teorici che, come lui, facevano lavoro di frontiera sull'unificazione delle forze, e per i quali il fatto che le interazioni deboli sembrassero richiedere solo vettori di forza elettricamente carichi era una frustrazione. Così fu aperta la caccia alle correnti neutre.

Fondamentalmente, tutto ciò che scorre è una corrente. Una corrente d'acqua scorre in un fiume o in un tubo; una corrente di elettroni scorre in un filo o in una soluzione. W^+ e W^- mediano il flusso delle particelle da uno stato all'altro, e probabilmente è stato il bisogno di seguire le tracce della carica elettrica a generare il concetto di «corrente»; W^+ media la corrente positiva, W^- media la corrente negativa. Tali correnti vengono studiate nel contesto dei decadimenti deboli spontanei come quelli appena descritti; ma possono anche essere generate da collisioni di neutrini negli acceleratori, divenute possibili dopo che, nell'esperimento dei due neutrini a Brookhaven, avevamo imparato a creare dei fasci di queste particelle.

Consideriamo quello che accade quando un neutrino muonico – quindi del tipo da noi scoperto a Brookhaven – urta un protone, o meglio un quark «su» dentro il protone. La collisione di un antineutrino muonico con un quark «su» genera un quark «giù» e un muone positivo:

$$\bar{\nu}_\mu + \mathbf{u}^{-2/3} \rightarrow \mathbf{d}^{-1/3} + \mu^{+1}$$

Detto in italiano: antineutrino muonico più quark «su» → quark «giù» più muone positivo. In effetti, quando il neutrino e il quark «su» si scontrano, quest'ultimo si trasforma in un quark «giù» e il neutrino diventa un muone. Anche qui, secondo la teoria dell'interazione debole, il processo reale è una successione di due reazioni:

$$1)\ \bar{\nu}_\mu \rightarrow W^- + \mu^+$$
$$2)\ W^- + \mathbf{u} \rightarrow \mathbf{d}$$

L'antineutrino si scontra con il quark «su» ed esce dalla collisione come muone, il quark «su» si trasforma in quark «giù» e l'intera reazione è mediata dalla particella W negativa; abbiamo dunque una corrente negativa. Ora, già nel 1955 i teorici (e in particolare Julian Schwinger, maestro di Glashow) avevano osservato che era possibile una corrente neutra di questo tipo:

$$\nu_\mu + \mathbf{u} \rightarrow \mathbf{u} + \nu_\mu$$

Che cosa succede qui? Ci sono neutrini muonici e quark «su» da entrambi i lati della reazione. Il neutrino rimbalza sul quark, allontanandosene però quando è ancora un neutrino, e non un muone come nella reazione precedente; il quark «su» incassa un colpo ma rimane un quark «su», e poiché fa parte di un protone, quest'ultimo, per quanto sbattuto, rimane un protone. Se considerassimo questa reazione in modo superficiale, vedremmo un neutrino muonico che colpisce un protone e rimbalza via intatto; ma le cose sono più sottili. Nella reazione precedente era indispensabile una particella W, negativa o positiva, per facilitare la metamorfosi di un quark «su» in quark «giù» o viceversa; qui il neutrino deve emettere una particella messaggera per dare una spinta al quark «su» (ed esserne assorbito). Quando cerchiamo di scrivere la reazione risulta chiaro che la particella messaggera deve essere *neutra*.

Questa reazione è simile al modo in cui intendiamo l'interazione elettrica, poniamo, fra due protoni: viene scambiato un messaggero neutro, il fotone, e si produce così la legge coulombiana della forza, per la quale un protone può spingerne via un altro. Non c'è cambio di specie. Non è una somiglianza fortuita, e i cultori dell'unificazione (intendo Glashow e i suoi amici, non il reverendo Moon) avevano bisogno di un processo di questo tipo per continuare a pregare per l'unità fra interazione debole ed elettromagnetica.

Il problema sperimentale, dunque, era se si potessero realizzare reazioni in cui i neutrini si scontravano con i nuclei e ne venivano fuori come neutrini. Un ingrediente essenziale di una simile reazione doveva essere la possibilità di osservare l'impatto del neutrino sul nucleo colpito. Nell'esperimento dei due neutrini condotto a Brookhaven c'erano degli indizi di una reazione di questo tipo, ma erano ambigui: Mel Schwartz li chiamava «bussolotti». Entrava una particella neutra, usciva una particella neutra, la carica elettrica non cambiava, il nucleo colpito si spezzava, ma nel fascio di neutrini a energia relativamente bassa di Brookhaven appariva pochissima energia; di qui la

definizione di Schwartz. Erano delle correnti neutre. La particella messaggera debole neutra si chiama Z^0 (noi diciamo zeta zero) e non W^0 per ragioni che non ricordo; ma se volete far colpo sugli amici dite «correnti neutre», che è un modo fantasioso di esprimere l'idea che per avviare una reazione di interazione debole è necessaria una particella messaggera neutra.

Il respiro si accelera

Ma vediamo, per sommi capi, quello che ne pensavano i teorici.

L'interazione debole fu riconosciuta per la prima volta da Fermi negli anni Trenta; e quando mise per iscritto la sua teoria, egli la modellò, in parte, sulla teoria quantistica dei campi dell'interazione elettromagnetica, o elettrodinamica quantistica (QED). Egli cercò di capire se questa nuova interazione seguisse la dinamica di quella più vecchia (vecchia, ovviamente, dal punto di vista della nostra conoscenza). Ricordiamo che nella QED l'idea di campo è accompagnata da quella delle particelle messaggere, i fotoni; dunque anche la sua teoria dell'interazione debole aveva bisogno di particelle messaggere. Ma a che cosa potevano somigliare?

Il fotone ha massa zero, ed è questo a dare origine alla celebre legge dell'inverso del quadrato, valida, anche a grandi distanze, per l'interazione elettromagnetica; ma l'interazione debole ha un raggio d'azione piccolissimo, per cui Fermi si limitò ad assegnare una massa infinita alle particelle che la trasportavano. Molto logico. Alcune versioni successive della teoria di Fermi, e in particolare quella di Schwinger, introdussero le particelle W^+ e W^-, pesantissime, come vettori dell'interazione; e lo stesso hanno fatto diversi altri teorici, come Lee, Yang, Gell-Mann... Ma odio riconoscere i contributi dei teorici, perché questo ne manderà in bestia il 99%. E se qualche volta trascuro di citarne uno, non è perché l'ho dimenticato; probabilmente è perché lo odio.

E ora vengono i trabocchetti. Nella musica a programma, un tema ricorrente introduce un'idea, una persona o un animale, come il motivo conduttore di *Pierino e il lupo*, che ci annuncia che Pierino sta per entrare in scena; ma forse, in questo caso, è più adeguato il cupo violoncello che segnala la comparsa del grande squalo bianco in *Jaws*. Bene: sto per introdurre le prime note del tema del gran finale, il segno della particella di Dio. Ma non voglio rivelarla troppo presto. È meglio andar piano, come in un numero di strip-tease.

Fra la fine degli anni Sessanta e l'inizio dei Settanta diversi giova-

ni teorici cominciarono a studiare la teoria quantistica dei campi sperando di estendere alle altre interazioni il successo della QED. Si ricorderà che le eleganti soluzioni del problema dell'azione a distanza prospettate da questa teoria comportavano alcune difficoltà matematiche: quantità che dovrebbero essere piccole e misurabili figurano con valori infiniti nelle equazioni, e non è cosa da poco. Feynman e i suoi amici inventarono il processo di rinormalizzazione per occultare le infinità presenti nelle quantità misurate (come per esempio e e m, la carica e la massa dell'elettrone), e la QED fu dichiarata rinormalizzabile: è cioè una teoria in cui ci si può sbarazzare di queste infinità, che altrimenti la invaliderebbero. Ma quando la teoria quantistica dei campi fu applicata alle altre tre interazioni – debole, forte e gravitazionale – incontrò un insuccesso totale; e non sarebbe potuto accadere a ragazzi più simpatici. In queste interazioni niente frenava le infinità, e le cose andavano talmente male che veniva messa in dubbio l'utilità stessa della teoria. Così alcuni teorici riesaminarono la QED, cercando di capire perché (per l'elettromagnetismo) funzionava quella teoria, e non altre.

La QED, la teoria superprecisa che dà un valore di g esatto fino all'undicesima cifra decimale, appartiene alla classe delle cosiddette «teorie di gauge» (in questo contesto «gauge» significa scala, come nei modellini ferroviari HO-gauge). Una teoria di gauge esprime una simmetria astratta della natura legata molto strettamente a dei fatti sperimentali. C'è un articolo fondamentale di C.N. Yang e Robert Mills (1954) che mette in rilievo la potenza della simmetria di gauge: se la si utilizza, anziché proporre nuove particelle che spieghino fenomeni già osservati, si cercano simmetrie che li prevedano. Effettivamente questo genere di simmetria, applicata alla QED, generava le forze elettromagnetiche, garantiva la conservazione della carica e assicurava (gratis) una protezione dalle peggiori infinità, dato che le teorie con simmetria di gauge sono rinormalizzabili (imparare questa frase come scioglilingua e recitarla a pranzo). Ma le teorie di gauge richiedevano l'esistenza di particelle di gauge, e queste non erano altro che le particelle messaggere: i fotoni per la QED, W^+ e W^- per l'interazione debole e, ovviamente, i gluoni per quella forte.

Alcuni teorici, fra i più dotati e brillanti, avevano due motivi – anzi tre – per lavorare sull'interazione debole. Il primo era che questa forza è piena di infinità, e non era chiaro come adattarla a una teoria di gauge; il secondo era la ricerca dell'unificazione, tanto esaltata da Einstein e tanto cara anche a questo gruppo di giovani teorici. Al centro del loro interesse stava l'unificazione delle interazioni deboli ed elettromagnetiche: un'impresa da far paura, dal momento che l'interazione debole è molto meno intensa di quella elettromagnetica, ha un raggio d'azione enormemente inferiore e viola varie simmetrie, per esempio la parità (a parte questo, le due interazioni sono somigliantissime).

Il terzo motivo era che chi risolveva l'enigma ne avrebbe ricavato fama e gloria. I principali concorrenti erano Steven Weinberg, che allora era a Princeton, Sheldon Glashow, membro, insieme a Weinberg, di un club di fantascienza, Abdus Salam, il genio pachistano dell'Imperial College di Londra, Martinus Veltman di Utrecht, in Olanda, e il suo allievo Gerard 't Hooft. Lo scenario era già stato allestito dai teorici più anziani (che allora si avvicinavano alla quarantina): Schwinger, Gell-Mann, Feynman. E molti altri giravano intorno: Jeffrey Goldstone e Peter Higgs erano dei preziosi suonatori di ottavino.

Ma lasciamo perdere un resoconto dettagliato dei giri di valzer teorici che ci furono fra il 1960 e la metà degli anni Settanta, e limitiamoci a dire che alla fine si ottenne una teoria rinormalizzabile dell'interazione debole e contemporaneamente si scoprì che un matrimonio con l'interazione elettromagnetica, QED, non sembrava più così contro natura. Per arrivare a tanto, però, si era dovuta mettere insieme una famiglia unica di particelle messaggere per l'interazione «elettrodebole» complessiva: W^+, W^-, Z^0 e il fotone. Somigliava a uno di quei gruppi familiari misti in cui fratellastri e sorellastre nati da precedenti matrimoni cercano, nonostante tutto, di convivere armoniosamente sebbene ci sia un solo bagno per tutti. La nuova particella pesante Z^0 contribuiva a soddisfare le esigenze della teoria di gauge, e le quattro particelle, messe insieme, rendevano conto dei requisiti della violazione della parità e della vistosa debolezza dell'interazione debole. Tuttavia, a quest'epoca (cioè prima del 1970) non solo non erano mai state viste le particelle W e Z, ma nemmeno erano state osservate reazioni che potessero essere prodotte da Z^0; e come si poteva parlare di interazione elettrodebole unificata, quando in laboratorio qualsiasi ragazzino poteva far notare le enormi differenze di comportamento esistenti fra l'interazione elettromagnetica e quella debole?

Uno dei problemi con i quali gli esperti si dovevano confrontare (ciascuno per conto suo, in ufficio, a casa o su una poltrona d'aeroplano) era che l'interazione debole, avendo un raggio d'azione breve, aveva bisogno di vettori pesanti; ma la teoria di gauge non pre-

vedeva messaggeri pesanti, e protestava producendo delle infinità, cioè dei pugnali, per le viscere intellettuali dei teorici. E poi come fanno W^+, W^- e Z^0, cioè tre particelle pesanti, a convivere felicemente nella stessa famiglia con il fotone, che non ha massa?

Peter Higgs dell'Università di Manchester, in Inghilterra, propose una soluzione – ancora una particella, della quale parleremo fra breve – che fu sfruttata da Steven Weinberg, allora a Harvard (oggi è all'Università del Texas). È chiaro che noi, idraulici di laboratorio, non vediamo la simmetria elettrodebole. I teorici lo sanno, ma hanno un bisogno disperato di questa simmetria nelle equazioni di base; perciò dobbiamo trovare un modo di installare questa simmetria, salvo smantellarla quando le equazioni si abbassano a prevedere i risultati degli esperimenti. Il mondo è perfetto in astratto, ma diventa imperfetto quando scendiamo ai dettagli, capito? E un po' di pazienza: non sono stato io a inventarmi tutto questo. Ma ecco come funziona la faccenda.

Weinberg aveva scoperto, attraverso il lavoro di Higgs, un meccanismo grazie al quale un insieme primordiale di particelle messaggere prive di massa, che rappresentava un'interazione elettrodebole unificata, acquistava massa nutrendosi, per esprimerci in modo molto poetico, delle componenti non volute della teoria. Va bene così? No? Insomma, usava l'idea di Higgs per distruggere la simmetria! Le particelle W e Z acquistavano massa, il fotone rimaneva tale e quale e dalle ceneri della teoria unificata, ormai distrutta, apparivano l'interazione debole e quella elettromagnetica. Le particelle W e Z, così massicce, giravano intorno creando la radioattività delle particelle e quelle reazioni che, di tanto in tanto, interferivano con i neutrini che attraversavano l'universo, mentre i fotoni messaggeri generavano l'elettricità che tutti noi conosciamo, amiamo e paghiamo: ed ecco la radioattività (interazione debole) e la luce (elettromagnetismo) elegantemente (?) unite l'una all'altra. In realtà l'idea di Higgs non distruggeva la simmetria, ma si limitava a nasconderla.

Restava un solo problema: perché qualcuno avrebbe dovuto credere a quei castelli in aria matematici? Tini Veltman (che è tutt'altro che mingherlino)* e Gerard 't Hooft avevano lavorato in questo stesso campo, forse anche in modo più accurato, e avevano dimostrato che, se si ricorreva allo stratagemma (ancora misterioso) di Higgs per rompere la simmetria, tutte le infinità che laceravano e caratterizzavano la teoria scomparivano, e quello che rimaneva era di una pulizia da applauso. Rinormalizzato.

* Gioco di parole intraducibile. In inglese, *tiny* significa «mingherlino». (*NdT*)

Matematicamente, nelle equazioni tutto un insieme di termini compariva con segni tali da elidere altri termini che tradizionalmente erano infiniti. Per ottenere questo risultato in modo sistematico 't Hooft scrisse un programma per computer, e un giorno di luglio del 1971 osservò le risposte che uscivano, man mano che degli integrali molto complicati venivano sottratti ad altri altrettanto complicati. Ognuno di questi integrali, se valutato separatamente, avrebbe dato un risultato infinito; ma, man mano che la lettura finale usciva, il computer, termine dopo termine, stampava «0». Era la tesi di 't Hooft; e sarà ricordata, insieme a quella di de Broglie, come una tesi di dottorato che ha fatto la storia.

Trovate zeta zero

Ma ora basta con la teoria (che, bisogna ammetterlo, è complicata). Ci torneremo più avanti; e un principio pedagogico fermamente acquisito in circa quarant'anni di confronto con gli studenti, dalle matricole agli specializzandi, mi dice che anche se al primo passaggio una cosa è incomprensibile al 97%, la volta successiva sarà, in qualche modo, ossessivamente familiare.

Che implicazioni aveva questa teoria per il mondo reale? Quella importante dovrà aspettare il capitolo VIII. Nel 1970 l'implicazione immediata, per gli sperimentatori, era che perché tutto funzionasse doveva esistere uno Z^0; e se era una particella, avremmo dovuto trovarla. Lo Z^0 era neutro come la particella sua sorellastra, il fotone; ma l'ipotesi era che, a differenza del fotone che è privo di massa, fosse molto pesante, come i suoi fratelli, i gemelli W. Il nostro compito, dunque, era chiaro: cercare qualcosa che somigliasse a un fotone pesante.

Le particelle W erano state cercate in molti esperimenti, diversi dei quali erano miei. Avevamo osservato le collisioni dei neutrini; non avevamo visto nessuna particella W; avevamo concluso che il fatto di non averla trovata era comprensibile solo se la sua massa era superiore a 2 GeV. Se fosse stata più leggera, nella seconda serie dei nostri esperimenti con i neutrini a Brookhaven si sarebbe fatta vedere. Osservammo anche le collisioni dei protoni: niente W, dunque la sua massa, a questo punto, doveva essere superiore a 5 GeV. Anche i teorici avevano le loro idee sulle proprietà di W e continuavano ad aumentarle la massa, finché, nei tardi anni Settanta, la previdero intorno ai 70 GeV: troppo alta per le macchine dell'epoca.

Ma torniamo a Z^0. Un neutrino esce da un nucleo; se emette una particella W^+ (un antineutrino emetterà una particella W^-) si trasforma in muone, ma può emettere anche una particella Z^0, e in tal caso rimarrà neutrino. Poiché, come ho già ricordato, seguendo i leptoni non troviamo nessun cambiamento di carica elettrica, diciamo che questa è una corrente neutra.

Nella realtà non è facile effettuare un esperimento che riveli le correnti neutre. Quelli che lasciano la firma sono un neutrino invisibile in entrata più uno altrettanto invisibile in uscita, insieme a un grappolo di adroni prodotti dal nucleone colpito, e non fa molta impressione vedere un solo grappolo di adroni nell'apparato rivelatore. Un neutrone di fondo avrebbe lo stesso effetto. Al CERN una camera a bolle gigante chiamata Gargamelle cominciò a operare con un fascio di neutrini nel 1971; l'acceleratore era il PS, una macchina da 30 GeV che produceva neutrini di circa 1 GeV. Nel 1972 il gruppo del CERN era già sulle tracce di eventi senza muoni; contemporaneamente la nuova macchina del Fermilab mandava neutrini di 50 GeV verso un massiccio rivelatore di neutrini manovrato da David Cline (Università del Wisconsin), Alfred Mann (Università della Pennsylvania) e Carlo Rubbia (Harvard, CERN, Italia settentrionale, Alitalia...).

Non possiamo rendere piena giustizia alla storia di questa scoperta: è piena di Sturm und Drang, interesse umano e sociopolitica della scienza. Così la salteremo, e ci limiteremo a dire che nel 1973 il gruppo di Gargamelle annunciò, in via provvisoria, di avere osservato delle correnti neutre. Al Fermilab anche il gruppo Cline-Mann-Rubbia aveva dei dati così così. L'offuscamento da rumori di fondo era serio, e il segnale non era di quelli che ti fanno una grande impressione. Così decisero che avevano trovato le correnti neutre; poi si tirarono indietro; poi si ridecisero... Un tipo spiritoso battezzò «correnti neutre alternate» le loro fatiche.

Nel 1974, all'epoca della conferenza Rochester (un convegno internazionale biennale) di Londra, tutto si era chiarito: il CERN aveva scoperto le correnti neutre e il gruppo del Fermilab disponeva di conferme convincenti del segnale. I dati indicavano che doveva esistere «qualcosa di simile a uno Z^0». Ma se stiamo strettamente ai dati acquisiti, anche se le correnti neutre vennero accertate nel 1974 ci vollero altri nove anni per dimostrare direttamente l'esistenza di Z^0. Il merito andò al CERN, nel 1983. La massa? Quell'affare era veramente pesante: 91 GeV.

Fra l'altro, a metà del 1992 la macchina LEP del CERN aveva registrato più di due milioni di particelle Z^0, messi insieme dai suoi

quattro enormi rivelatori. Lo studio della produzione e del successivo decadimento di Z^0 ci sta fornendo una cornucopia di dati e dà da lavorare a qualcosa come 1400 fisici. Ricordiamo che quando Ernest Rutherford scoprì le particelle alfa, le spiegò e subito cominciò a usarle come strumento per la scoperta del nucleo. Con i neutrini abbiamo fatto la stessa cosa; e anche i fasci di neutrini, come abbiamo appena visto, sono diventati un'industria, utile per scoprire particelle messaggere, studiare i quark e fare un sacco di altre cose. La fantasia di ieri è la scoperta di oggi e lo strumento di domani.

Ancora l'interazione forte: i gluoni

Negli anni Settanta avevamo bisogno di un'altra scoperta per completare il modello standard. Avevamo i quark: ma sono legati l'uno all'altro con tanta forza che un quark libero non esiste. Qual è il meccanismo del vincolo? Ricorremmo alla teoria quantistica dei campi, ma i risultati furono, ancora una volta, frustranti. Bjorken aveva chiarito i vecchi risultati sperimentali di Stanford nei quali gli elettroni rimbalzavano dai quark dei protoni e, qualunque fosse la forza di legame, la dispersione degli elettroni indicava che quando i quark erano vicini essa era sorprendentemente debole.

Era un risultato eccitante, perché volevamo applicare la simmetria di gauge anche a questo campo. Le teorie di gauge riuscivano a prevedere una cosa controintuitiva, cioè che l'interazione forte diventa molto debole da vicino, mentre si intensifica quando i quark si allontanano. Questo processo, scoperto da alcuni ragazzi – David Politzer di Harvard e David Gross e Frank Wilczek di Princeton – portava un nome che avrebbe fatto l'invidia di qualsiasi politico, «libertà asintotica»; asintotico significa, più o meno, «che si avvicina sempre più, ma non arriva mai a toccare». I quark hanno una libertà asintotica: l'interazione forte diventa sempre più debole man mano che un quark si avvicina a un altro, e questo significa, paradossalmente, che quando due di loro sono molto vicini si comportano quasi come se fossero liberi, mentre quando si allontanano le interazioni diventano molto più intense. Ora, distanza breve significa alta energia: dunque l'interazione forte si indebolisce alle alte energie, l'esatto opposto di quello che fa l'interazione elettrica (le cose diventano sempre più strane, disse Alice). E – ancora più importante – l'interazione forte aveva bisogno di una particella messaggera, come le altre forze, e a questa particella diedero, da qualche parte, il nome di gluone. Ma dare un nome non significa conoscere.

A queste considerazioni è pertinente un'altra idea che viene fuori, un po' qua un po' là, dalle pubblicazioni teoriche; e il nome, a questa, l'ha dato Gell-Mann. Si chiama *colore*, ma non ha niente a che fare con il colore come lo conosco io o come lo conoscete voi. Il colore spiega certi risultati sperimentali e ne prevede altri; per esempio, spiega come è possibile che un protone abbia due quark «su» e un quark «giù» nonostante il principio di Pauli, che esclude espressamente che due oggetti identici abbiano lo stesso stato. Se uno dei quark «giù» è azzurro e l'altro è verde, la regola di Pauli è soddisfatta. Grazie al colore, l'interazione forte possiede un equivalente della carica elettrica.

Gell-Mann e altri che hanno lavorato in questo giardino hanno stabilito che il colore deve essere di *tre* tipi. Si ricorderà che Faraday e Ben Franklin avevano stabilito che la carica elettrica era di due tipi, positiva e negativa; ma per i quark ce ne vogliono tre, dunque i quark sono di tre colori. Forse questa idea è stata presa dalla tavolozza, perché i colori primari sono tre; o forse è migliore un'altra analogia, cioè che la carica elettrica è unidimensionale, con una direzione positiva e una negativa, mentre il colore è tridimensionale (tre assi: rosso, azzurro e verde). Esso spiega perché le combinazioni di quark sono soltanto o coppie di quark e antiquark (mesoni) o triplette di quark (barioni). Queste combinazioni, infatti, non hanno colore, e quando osserviamo un mesone o un barione, la qualità essenziale del quark scompare. Un quark rosso si combina con un antiquark antirosso per generare un mesone incolore: il rosso e l'antirosso si elidono. E il quark rosso, quello azzurro e quello verde di un protone si mescolano, analogamente, per produrre il bianco (provate a far girare una ruota con i colori dell'iride), che è di nuovo incolore.

Ma la parola «colore», anche se queste sono buone ragioni per usarla, non va presa alla lettera. Stiamo solo descrivendo un'altra proprietà astratta, assegnata ai quark dai teorici per spiegare una quantità di dati sempre crescente. Avremmo potuto usare «Tom», «Dick» e «Harry», o A, B e C, ma la metafora del colore era più adatta (più colorata?). E così esso, insieme ai quark e ai gluoni, sembrava destinato a essere per sempre un elemento della scatola nera, un'entità astratta che non farà mai ticchettare un contatore Geiger, non lascerà mai una traccia in una camera a bolle e non solleticherà mai i fili di un rivelatore elettronico.

Tuttavia, l'idea che l'interazione forte si indebolisse man mano che due quark si avvicinavano l'uno all'altro era eccitante, dal punto di vista delle unificazioni di là da venire. Quando la distanza fra due particelle diminuisce, la loro energia relativa aumenta (una distanza breve significa un'alta energia); questa libertà asintotica implica dunque che l'interazione forte si indebolisca alle alte energie, e ciò permetteva ai cercatori di nuove unificazioni di sperare che a un'energia sufficientemente alta l'intensità dell'interazione forte si avvicinasse a quella dell'interazione elettrodebole.

E le particelle messaggere? Come descrivere i vettori dell'interazione-colore? Quello che si sapeva era che i gluoni trasportano *due colori*, o meglio un colore e un *anticolore* (diverso), e che quando sono emessi o assorbiti da un quark ne cambiano il colore. Un gluone rosso-antiazzurro, per esempio, trasforma un quark rosso in antiazzurro. All'origine dell'interazione forte c'è questo scambio, e Murray il Gran Maestro dei Nomi battezzò la teoria «cromodinamica quantistica» (*Quantum Chromodynamics*, QCD), in assonanza con l'elettrodinamica quantistica (QED). Ora, questa necessità dello scambio di colori implica che ci vuole un numero di gluoni sufficiente a effettuare tutti gli scambi possibili, e viene fuori che otto gluoni bastano. Ma se chiedete a un teorico «Perché otto?», vi risponderà, saggiamente: «Perché è uguale a nove meno uno».

Il nostro disagio di fronte al fatto di non potere mai osservare i quark all'esterno degli adroni era temperato solo in parte da una rappresentazione fisica del motivo per cui sono confinati in eterno. A breve distanza i quark hanno fra loro interazioni relativamente poco importanti; è questo il campo in cui i teorici possono calcolare le proprietà dello stato dei quark e la loro influenza sugli esperimenti di collisione, caricandosi di gloria. Ma man mano che i quark si discostano l'uno dall'altro, l'interazione diventa più intensa e l'energia necessaria per allontanarli ulteriormente aumenta con rapidità, finché (molto prima di un'effettiva separazione) l'ingresso di nuova energia porta alla creazione di un'altra coppia quark-antiquark. Questa strana proprietà è dovuta al fatto che i gluoni non sono semplici particelle messaggere che trasportano interazioni senza fare nient'altro, ma agiscono gli uni sugli altri. Qui la QCD diverge dalla QED; i fotoni, infatti, si ignorano fra loro.

Fra la QED e la QCD, tuttavia, ci sono anche varie analogie molto strette, soprattutto nel campo delle alte energie. I successi della QCD sono arrivati a poco a poco, ma con ritmo costante. I calcoli non sono mai stati molto precisi perché a lunga distanza l'interazione non ha valori esatti, e numerosi esperimenti si concludevano con l'affermazione, abbastanza nebulosa, che «i nostri risultati sono compatibili con le previsioni della QCD».

Ma allora che genere di teoria abbiamo, se non possiamo mai, ma proprio mai, vedere un quark libero? Possiamo fare degli esperimenti che rivelano la presenza di elettroni e li misurano per lungo e per largo, anche quando sono tutti legati all'interno di un atomo. Si può fare la stessa cosa con i quark e i gluoni? Bjorken e Feynman hanno ipotizzato che in una collisione molto dura i quark più carichi d'energia saltino fuori per un attimo e, appena prima di liberarsi dell'influenza dei quark coniugati, si mascherino entro un fascio compatto di adroni – per esempio tre pioni, o quattro, o otto, e magari aggiungiamoci anche dei kaoni e dei nucleoni – che seguono tutti da vicino il percorso del quark genitore. Questi fasci di adroni presero il nome di «getti», e la ricerca iniziò.

Con le macchine degli anni Settanta non era facile distinguere i getti, perché riuscivamo a produrre solo dei quark lenti che davano origine a getti molto allargati e con un piccolo numero di adroni; noi volevamo dei getti densi, compatti. Il primo successo toccò a una giovane sperimentatrice, Gail Hanson, che aveva conseguito il dottorato al MIT e lavorava allo SLAC; la sua analisi statistica, molto accurata, rivelò che nei detriti di una collisione $e^+ e^-$ da 3 GeV dello SPEAR *c'era*, effettivamente, una correlazione fra adroni. Gail fu aiutata dal fatto che entravano elettroni e uscivano un quark e un antiquark, schiena contro schiena per conservare il momento, e i loro getti correlati erano evidenziati, in modo debole ma chiaro, dall'analisi. Mentre sedevo, con Democrito, nella stanza di controllo del CDF, sullo schermo, a intervalli di pochi minuti, lampeggiavano a due per volta dei getti di una decina di adroni ciascuno, sottili come aghi e separati da un angolo di 180 gradi. Una struttura come questa non ha ragione di esistere, a meno che il getto sia prodotto da un quark con energia e momento molto elevati che «si veste» prima di uscire.

Ma la principale scoperta degli anni Settanta, in questa direzione, fu fatta con la macchina $e^+ e^-$ PETRA di Amburgo. Anche PETRA, che creava collisioni con un'energia totale di 30 GeV, mostrava, senza che fosse necessaria un'analisi, la struttura a due getti; era quasi possibile vedere i quark nei dati. Ma si vedeva anche dell'altro.

Anche uno dei quattro rivelatori facenti parte di PETRA aveva il suo acronimo: TASSO, cioè *Two-Armed Solenoidal Spectrometer*, «spettrometro solenoidale a due braccia»; il gruppo di TASSO cercava eventi nei quali comparissero tre getti. Una delle conseguenze della QCD è che, quando un e^+ e un e^- si annichilano per produrre un quark e un antiquark, esiste una ragionevole probabilità che uno dei quark in uscita irradi una particella messaggera, cioè un gluone. A questo livello l'energia è sufficiente a convertire un gluone «virtuale» in reale. Ma i gluoni sono ritrosi come i quark e, come i quark, «si vestono» prima di uscire dalla scatola nera nella quale hanno luogo gli incontri; è per questo che i getti di adroni dovevano essere tre. Ma ci voleva più energia.

Nel 1978 due prove con un'energia totale di 13 e 17 GeV non produssero niente, ma a 27 GeV accadde qualcosa. L'analisi fu condotta da un'altra donna, Sau Lan Wu, professoressa all'Università del Wisconsin. Il programma della Wu scoprì subito più di quaranta eventi con tre getti di adroni ognuno dei quali aveva da tre a dieci tracce (adroni). L'insieme assomigliava al motivo ornamentale che hanno le Mercedes sul cofano.

Gli altri gruppi di PETRA saltarono immediatamente sul carro della vincitrice e anche loro, ispezionando i propri dati, scoprirono degli eventi con tre getti. Dopo un anno ne erano stati raccolti a migliaia; il gluone era stato «visto». L'andamento delle tracce era stato calcolato dal teorico John Ellis del CERN usando la QCD, e si deve riconoscere che il suo intervento diede una forte motivazione alla ricerca. La scoperta del gluone fu annunciata a una conferenza presso il Fermilab nell'estate del 1979, e toccò a me spiegarla durante il «Phil Donahue Show», a Chicago. Per la verità, misi più impegno a spiegare che il Fermilab non si teneva in laboratorio dei bufali come sistema di allarme rapido per il pericolo di radiazioni; ma in fisica la vera notizia erano i gluoni: i bosoni, non i bisonti.

E così, adesso abbiamo tutte le particelle messaggere o, per usare un termine più erudito, tutti i bosoni «gauge». «Gauge» viene dalla simmetria di gauge, «bosone» deriva dal fisico indiano S.N. Bose, che ha descritto la classe delle particelle con valori di spin interi. Mentre le particelle materiali hanno tutte spin 1/2 e si chiamano fermioni, le particelle messaggere hanno tutte spin 1 e sono bosoni; ma abbiamo saltato alcuni dettagli. Il fotone, per esempio, fu previsto da Einstein nel 1905 e osservato sperimentalmente nel 1923 da Arthur Compton, che usò raggi X dispersi da elettroni atomici. E sebbene le correnti neutre fossero state scoperte a metà degli anni Settanta, le particelle W e Z non furono osservate direttamente prima del 1983-84, quando furono scoperte nel collisore di adroni del CERN. I gluoni, come ho già detto, erano caduti nella rete nel 1979.

È da notare che in questa lunga discussione dell'interazione forte abbiamo considerato l'interazione fra quark e quark trasportata, per definizione, dai gluoni. Ma che fine ha fatto la «vecchia» interazione

forte fra neutroni e protoni? Oggi la interpretiamo come un effetto residuale dei gluoni che filtra, per così dire, dai neutroni e protoni legati insieme nel nucleo. E la vecchia interazione forte, definita (ed era una buona definizione) come scambio di pioni, è considerata una conseguenza delle complessità dei processi quark-gluone.

Capolinea?

All'inizio degli anni Ottanta avevamo calcolato i parametri di tutte le particelle materiali (quark e leptoni) e ormai conoscevamo discretamente anche le particelle messaggere, o bosoni «gauge», delle tre interazioni (gravità esclusa). Aggiungendo le particelle delle interazioni a quelle materiali otteniamo il modello standard (MS) completo. Ecco qui il «segreto dell'universo»:

MATERIA		
Prima generazione	*Seconda generazione*	*Terza generazione*
	QUARK	
u	**c**	**t?**
d	**s**	**b**
	LEPTONI	
ν_e	ν_μ	ν_τ
e	μ	τ

INTERAZIONI

BOSONI «GAUGE»

elettromagnetismo	fotone (γ)
interazione debole	$W^- W^+ Z^0$
interazione forte	otto gluoni

Ricordiamo che i quark sono di tre colori; perciò, se vogliamo fare gli antipatici, possiamo contare diciotto quark, sei leptoni e dodici bosoni «gauge» che trasportano le interazioni. Inoltre si deve considerare un'antitavola nella quale tutte le particelle materiali figurano come antiparticelle. Dunque avremmo, in totale, sessanta particelle; ma chi le conta? Stiamo a questa tavola, non abbiamo bisogno di sapere altro. Possiamo credere, finalmente, di avere gli a-tomi di Democrito: sono i quark e i leptoni. E le tre interazioni, con le loro particelle messaggere, spiegano il «moto violento costante» di cui egli parla.

Riassumere l'intero universo in un diagramma, sia pure pasticciato, può sembrare arrogante. Ma gli esseri umani mostrano una chiara tendenza a costruire sintesi di questo tipo; nella storia dell'Occidente i «modelli standard» sono un tema ricorrente. Quello attuale ha ricevuto questo nome solo negli anni Settanta, e il termine, anzi, è tipico della storia moderna e recente della fisica; ma nel corso dei secoli sono esistiti, sicuramente, altri modelli standard. Possiamo vederne alcuni nella pagina seguente.

Perché il nostro modello standard risulta «incompleto»? Una prima (e ovvia) lacuna è che il quark «alto» non è stato ancora osservato; un'altra è che manca una delle interazioni, la gravità, e nessuno sa come inserire questa grande e antica forza nel modello. Poi c'è un difetto estetico: non è abbastanza semplice, dovrebbe somigliare di più al sistema di Empedocle, terra, aria, acqua e fuoco più amore e odio. Nel modello standard ci sono troppi parametri, troppe manopole da girare.

Con questo non voglio dire che il modello standard non sia una delle grandi conquiste della scienza: rappresenta il lavoro di quelli (d'entrambi i sessi) che hanno fatto tardi la sera. Ma pur ammirandone la bellezza e l'ampiezza non si può fare a meno di sentirsi a disagio, di desiderare qualcosa di più semplice, un modello che avrebbe potuto essere amato anche da un antico Greco.

Ascoltate. Non sentite arrivare una risata dal vuoto?

IL MODELLO STANDARD: UNA STORIA «ACCELERATA»

Architetto	*Data*	*Particelle*	*Forze*	*Voto*	*Commento*
Talete (milesio)	600 a.C.	Acqua	Non menzionate	**B-**	Fu il primo a spiegare il mondo supponendo cause naturali e non dèi. Sostituisce la mitologia con la logica.
Empedocle (agrigentino)	460 a.C.	Terra, aria, acqua, fuoco	Amore e odio	**B+**	Propone l'idea di molteplici «particelle» che si combinano formando tutti i tipi di materia.
Democrito (abderita)	430 a.C.	L'*atomos*, o a-tomo, invisibile e indivisibile	Moto violento continuo	**A**	Il modello richiede troppe particelle, tutte di forma diversa, ma l'idea fondamentale di a-tomo indivisibile continua a definire la particella elementare.
Isaac Newton (inglese)	1687	Atomi duri, impenetrabili, dotati di massa	Gravità (cosmo); forze sconosciute (atomi)	**C**	Amava gli atomi ma non ne promosse la causa. La sua gravità dà il mal di testa ai grossi papaveri degli anni Novanta.
Ruggero Giuseppe Boscovich (dalmata)	1760	«Punti di forza» indivisibili e senza forma o dimensioni	Attrazione e repulsione fra punti	**B+**	La teoria è incompleta e limitata, ma l'idea di particelle puntiformi di «raggio zero» che creano «campi di forza» è essenziale per la fisica moderna.
John Dalton (inglese)	1808	Atomi come unità di base degli elementi chimici: carbonio, ossigeno ecc.	Attrazione fra atomi	**C+**	Fece un pasticcio resuscitando il termine di Democrito – l'atomo di Dalton non è indivisibile – ma indovinò un'idea giusta: che gli atomi differiscono per peso, non per forma come pensava Democrito.
Michael Faraday (inglese)	1820	Cariche elettriche	Elettromagnetismo (più gravità)	**B**	Applicò l'atomismo all'elettricità supponendo che la corrente consistesse di «corpuscoli di elettricità» (elettroni).
Dmitrij Mendeleev (siberiano)	1870	Oltre cinquanta atomi disposti nella tavola periodica degli elementi	Non fa ipotesi	**B**	Utilizzando il concetto di Dalton, organizza gli elementi chimici conosciuti. La sua tavola periodica fa decisamente pensare a una struttura più profonda e significativa.
Ernest Rutherford (neozelandese)	1911	Due particelle, nucleo ed elettrone	Interazione nucleare (forte) più elettromagnetismo e gravità	**A-**	Scoprendo il nucleo, rivela una nuova semplicità in tutti gli atomi di Dalton.
Bjorken, Fermi, Friedman, Gell-Mann, Glashow, Kendall, Lederman, Perl, Richter, Schwartz, Steinberger, Taylor, Ting più alcune migliaia	1992	Sei quark e sei leptoni, più le rispettive antiparticelle. I quark si distinguono in tre colori	Elettromagnetismo, interazione forte, interazione debole; dodici particelle-vettore (più la gravità)	**Incompleto**	«Ρισατα» (risata) *Democrito di Abdera*

VIII

La particella di Dio, finalmente

E Lei, l'Onnipotente, guardò il Suo mondo, e molto si meravigliò della sua bellezza; poiché tanta bellezza v'era, che pianse. Era un mondo con un solo tipo di particella e una sola forza, trasportata da un solo messaggero che era, con divina semplicità, anche l'unica particella.

E l'Onnipotente guardò il mondo che aveva creato e vide che era anche noioso. Perciò fece due conti, sorrise ed espanse e raffredò il Suo universo. Ed ecco, esso divenne abbastanza freddo da attivare il Suo agente vero e provato, il campo di Higgs, che prima del raffreddamento non poteva reggere l'incredibile calore della creazione. E sotto l'influenza di Higgs, le particelle succhiarono energia dal campo e assorbirono questa energia e acquistarono massa. Ciascuna crebbe secondo la sua via, ma non tutte allo stesso modo. Alcune divennero incredibilmente massicce, alcune soltanto un po' e alcune per nulla. E mentre prima c'era una sola particella ora ce n'erano dodici, e mentre prima il messaggero e la particella erano uguali ora erano diversi, e mentre prima c'era un solo vettore di forza e una sola forza ora c'erano dodici vettori e quattro forze, e mentre prima c'era una bellezza senza fine e significato ora c'erano i democratici e i repubblicani.

E l'Onnipotente guardò il mondo che aveva creato e fu scossa da risate assolutamente incontrollabili. E fece venire a sé Higgs e, frenando la propria ilarità, lo trattò severamente e disse:

«Perché hai distrutto la simmetria del mondo?»

E Higgs, abbattuto per tale lieve segno di disapprovazione, si difese così:

«Ma, capo, io non ho distrutto la simmetria. Ho solo fatto sì che essa fosse nascosta dall'artificio del consumo d'energia. E così facendo, in verità, ho reso complicato il mondo.

«Chi poteva immaginare che da questo monotono insieme di oggetti identici avremmo ricavato nuclei, atomi, molecole, pianeti e stelle?

«Chi poteva prevedere i tramonti, gli oceani, la brodaglia organica formata da tutte quelle orribili molecole agitate dal fulmine e dal calore? Chi si poteva aspettare l'evoluzione, e tutti quei fisici che spingono e scandagliano e cercano ciò che io, al Tuo servizio, ho nascosto con tanta cura?»

E Lei, l'Onnipotente, trattenendo a stento il riso, decretò il perdono e un bell'aumento di stipendio per Higgs.

Nuovissimo Testamento, 3, 1

Il nostro compito, in questo capitolo, sarà quello di convertire la poesia (?) del *Nuovissimo Testamento* nella scienza «dura» della cosmologia delle particelle. Però non possiamo abbandonare la discussione del modello standard proprio adesso; ci sono alcuni fili staccati da annodare, più alcuni non annodabili. Nella storia del modello-standard-e-oltre sono importanti gli uni e gli altri, e dovrò raccontare

qualcun altro dei trionfi sperimentali che hanno confermato e stabilizzato la nostra attuale visione del microcosmo. Sono dettagli che ci faranno capire sia la potenza del modello sia i suoi limiti.

Nel modello standard ci sono due tipi di difetti che disturbano. I difetti del primo tipo hanno a che fare con l'incompletezza del modello. Oggi, all'inizio del 1993, manca ancora il quark «alto», uno dei neutrini (il tauonico) non è mai stato osservato direttamente e molti parametri indispensabili non ci sono noti con precisione: per esempio, non sappiamo se i neutrini hanno una massa a riposo, non sappiamo a che cosa sia dovuta la violazione della simmetria CP, cioè il processo che ha dato origine alla materia, e soprattutto abbiamo bisogno di introdurre un nuovo fenomeno, il cosiddetto campo di Higgs, per salvare la coerenza matematica del modello. I difetti del secondo tipo sono puramente estetici. Il modello standard è talmente complicato che molti lo vedono come una semplice tappa verso una visione del mondo più semplice. L'idea di Higgs e la particella che l'accompagna, il bosone di Higgs, sono pertinenti a tutti i problemi che abbiamo appena elencato, tanto che abbiamo pensato il titolo di questo libro – la particella di Dio – in loro onore.

Frammento di agonia del modello standard

Consideriamo il neutrino.

«Quale neutrino?»

Non ha importanza. Prendiamo il neutrino elettronico (la varietà da giardino, di prima generazione), dato che ha la massa più piccola (a meno che tutti i neutrini abbiano massa zero, naturalmente).

«Vada per il neutrino elettronico.»

Non ha carica elettrica.

Non ha interazioni forti o elettromagnetiche.

Non ha dimensioni, estensione spaziale. Il suo raggio è zero.

Forse non ha massa.

Niente (a parte i presidi di facoltà e i politici) ha così poche proprietà come un neutrino. La sua presenza è meno di un sussurro.

Da bambini recitavamo una poesiola:

Moschicina lì sul muro
tu non hai nessuno in giro?
No papino? No mammina?
Che vergogna, bastardina!

E adesso, da grande, io recito quest'altra:

Neutrinino senza pace
sei veloce come luce
ma non hai carica o massa
e nessuna dimensione.
Ah, non c'è più religione!

Eppure il neutrino esiste e ha una sorta di posizione, una traiettoria, che va sempre nella stessa direzione con una velocità vicina (o uguale) a quella della luce. Ha pure uno spin, anche se chiedendo che cos'è a girare* uno fa capire di non essersi ancora purificato dal torbido modo di pensare prequantistico. Lo spin è un carattere intrinseco del concetto di «particella» e, se la massa del neutrino è veramente nulla, la combinazione del suo spin e del suo moto uniforme alla velocità della luce gli dà un nuovo attributo, veramente unico: la cosiddetta «chiralità», che connette per l'eternità la direzione (oraria o antioraria) dello spin con quella del moto. La chiralità del neutrino può essere «destrorsa», il che significa che lo spin, visto nella direzione del moto, ha senso orario, o «sinistrorsa», il che significa che lo spin ha senso antiorario. In questo c'è una bella simmetria; per la teoria di gauge è preferibile che tutte le particelle abbiano massa zero e che ci sia una simmetria chirale universale. Ancora questa parola, simmetria.

Quella chirale è una delle eleganti simmetrie che descrivono i primi momenti dell'universo: uno schema unico che si ripete come carta da parati, ma senza fine e senza corridoi, porte o angoli a interrompere la monotonia. Non c'è da stupirsi che l'Onnipotente l'abbia trovata noiosa e abbia ordinato di far entrare in scena il campo di Higgs, per creare la massa e infrangere la simmetria chirale. E perché la massa infrange la simmetria chirale? Una volta che una particella ha massa, viaggia a una velocità inferiore a quella della luce, e l'osservatore può andare più veloce. Adesso, rispetto all'osservatore, la particella ha invertito la direzione del moto ma non lo spin, perciò un oggetto che è destrorso per alcuni osservatori appare sinistrorso ad altri. Ci sono però i neutrini, che forse sono dei superstiti della guerra della simmetria chirale, e il neutrino è sempre sinistrorso, l'antineutrino sempre destrorso. Questa direzionalità è una delle pochissime proprietà possedute dal poveretto.

I neutrini hanno però anche un'altra proprietà, l'interazione debole; emergono da processi deboli che durano un'eternità (a volte per microsecondi). Abbiamo già visto che possono scontrarsi con al-

* L'inglese *to spin* significa, appunto, «girare (su se stessi)». (*NdT*)

tre particelle, ma queste collisioni richiedono un tocco talmente ravvicinato, un'intimità talmente stretta, da essere estremamente rare. La probabilità che un neutrino subisca una collisione attraversando una lastra d'acciaio spessa due centimetri è uguale a quella di trovare, in un bicchiere d'acqua dell'Atlantico raccolta a caso, una piccola gemma gettata, sempre a caso, nell'immensità dell'oceano. Eppure, nonostante la sua mancanza di proprietà, il neutrino ha un'enorme influenza sul corso degli eventi. È la fuga di un numero immenso di neutrini dal nucleo, per esempio, a scatenare quelle esplosioni stellari che spargono nello spazio elementi pesanti appena cucinati dentro la stella, ormai condannata alla fine. Dopodiché i detriti dell'esplosione si riaggregano, ed è a essi che si devono il silicio, il ferro e le altre buone cose che troviamo sui pianeti.

Recentemente sono stati compiuti sforzi davvero accaniti per scoprire la massa del neutrino, ammesso che ne abbia una. I tre neutrini presenti nel modello standard sono candidati a sostenere la parte di quella che gli astronomi chiamano «materia oscura», e che secondo loro pervade l'universo e ne domina l'evoluzione, spinta dalla gravità. Finora sappiamo solo che i neutrini potrebbero avere una massa molto piccola... o una massa zero. Lo zero è un numero talmente particolare che anche la più piccola delle masse – uguale, poniamo, a un milionesimo di quella dell'elettrone – avrebbe una grande importanza teorica. E in quanto fanno parte del modello standard, i neutrini e la loro massa rientrano fra i suoi problemi aperti.

Semplicità nascosta: l'estasi del modello standard

Quando uno scienziato, per esempio di fede britannica, è veramente arrabbiato con qualcuno, tanto da usare gli insulti più estremi, dirà, ansimando: «Sporco aristotelico». Sono parole di battaglia, ed è difficile immaginare un'offesa più mortale. Un po' tutti attribuiscono ad Aristotele (con ogni probabilità irragionevolmente) la responsabilità di circa 2000 anni di mancato progresso della fisica, finché Galileo ebbe il coraggio e la convinzione necessari a sfidarlo, svergognando i suoi accoliti davanti alla folla di piazza dei Miracoli, dove la torre continua a pendere e la spianata è piena di venditori di souvenir e gelatai.

L'abbiamo già vista, questa storia di oggetti che cadono da torri un po' sbilenche: la piuma che svolazza, la palla d'acciaio che scende veloce. Sembravano ottime osservazioni ad Aristotele, che affermò: «Pesante cade veloce, leggero cade lento». Perfettamente intuitivo. E se fate rotolare una palla, finirà per fermarsi; perciò, disse Ari, la quiete è «naturale e preferita, mentre il moto richiede una forza motrice che lo perpetui». Supremamente chiaro, confermato dalla nostra esperienza quotidiana e tuttavia... sbagliato. Ma Galileo riservò il proprio disprezzo non ad Aristotele, bensì alle generazioni di filosofi che si erano prosternate nel suo tempio e avevano accettato le sue idee senza discutere.

Che cosa vide Galileo? Vide una profonda semplicità nelle leggi del moto se solo si fossero potute rimuovere fonti di complicazioni come la resistenza dell'aria e l'attrito, cioè cose che fanno senz'altro parte del mondo reale ma ne nascondono, appunto, la semplicità. Secondo Galileo, il vero essere del mondo era matematico, fondato su parabole ed equazioni quadratiche. Il primo astronauta a porre piede sulla Luna, Neil Armstrong, lasciò cadere sulla superficie lunare, priva d'aria, una piuma e un martello, mostrando l'esperimento della torre agli spettatori di tutto il mondo. Senza resistenza, i due oggetti cadevano alla stessa velocità. E una palla che rotoli lungo una superficie orizzontale, in effetti, rotolerebbe in eterno se non ci fosse attrito; e su un tavolo molto levigato va più lontano, su un cuscino d'aria o su una sdrucciolevole distesa di ghiaccio più lontano ancora. Ci vuole una certa abilità per pensare in modo astratto, per immaginare un moto senz'aria o senza attrito volvente; ma quando ci riusciamo la ricompensa è una nuova comprensione delle leggi del moto, dello spazio e del tempo.

Dai tempi di questa storia così consolante abbiamo imparato parecchio sulla semplicità nascosta. È il modo di procedere della natura, che occulta la semplicità, la simmetria, la bellezza descrivibili per mezzo della matematica astratta. Quello che vediamo oggi, al posto della resistenza dell'aria e dell'attrito di Galileo (nonché di ostacoli politici equivalenti), è il modello standard. Ma per seguire questa idea fino agli anni Novanta dobbiamo riprendere la storia delle particelle messaggere pesanti che trasportano l'interazione debole.

Modello standard, 1980

Gli anni Ottanta si aprono con una buona dose di boria teorica. Il modello standard siede in trono, primo sommario di trecento anni di fisica delle particelle, e sfida gli sperimentali a «riempire gli spazi vuoti». Non sono stati ancora osservati né le particelle W^+, W^- e Z^0 né il quark «alto». Per il neutrino tauonico ci vuole un esperimento dei tre neutrini (e ne sono stati proposti, ma l'organizzazione è com-

plicata e le probabilità di successo scarse; così non sono stati approvati). Comunque, gli esperimenti sul leptone tau carico indicano decisamente che il neutrino tauonico deve esistere.

Il quark «alto» è ricercato da tutte le macchine, sia collisori elettrone-positrone sia collisori di protoni. I giapponesi stanno costruendo una macchina nuova di zecca, Tristan (qual è il nesso profondo fra cultura giapponese e mitologia teutonica?): è un collisore $e^+ e^-$ in grado di produrre il quark «alto» e il suo antiquark, $\mathbf{t\bar{t}}$,* purché la massa non sia superiore a 35 GeV, vale a dire sette volte di più del suo cugino «basso», dal sapore tutto diverso, che pesa 5 GeV. Ma non c'è speranza per l'esperimento di Tristan e le aspettative a esso legate, almeno per quanto riguarda il quark «alto». È veramente pesante.

La chimera dell'unificazione

Gli europei, decisi a dimostrare al mondo di sapere ormai camminare da soli in questo campo, si sono dedicati a corpo morto alla ricerca delle particelle W. Per trovarle ci vuole una macchina abbastanza potente da produrle: ma quanta è l'energia necessaria? Dipende dal peso della particella. Nel 1978 il CERN, rispondendo ai forti e insistenti argomenti di Carlo Rubbia, decise di costruire un collisore protone-antiprotone basato sulla macchina protonica da 400 GeV che aveva già.

Nei tardi anni Settanta i teorici stimavano che le particelle W e Z fossero «cento volte più pesanti del protone» (ricordiamo che la massa a riposo del protone è abbastanza vicina a un valore molto comodo, 1 GeV), e anzi erano talmente certi di questa stima che il CERN acconsentì a investire 100 milioni di dollari o più su una «cosa sicura», cioè un acceleratore capace di liberare, nel corso di una collisione, tanta energia da creare delle particelle W e Z, più una serie di rivelatori elaborati e costosi per osservare le collisioni. Che cosa dava ai suoi uomini tanta arrogante sicurezza?

C'era un'atmosfera di euforia, derivante dalla sensazione che la meta finale – una teoria unificata – fosse a portata di mano; non un modello del mondo con sei quark, sei leptoni e quattro interazioni, ma uno (forse) con una sola classe di particelle e una sola grande, ma tanto grande, interazione unificata. Avrebbe significato, indubbiamente, la realizzazione dell'antico punto di vista greco e del suo

* Dall'inglese *top*, «alto». (*NdT*)

obiettivo, sempre presente man mano che si passava dall'acqua all'aria alla terra al fuoco e all'unione di tutti e quattro gli elementi.

L'unificazione, intesa come ricerca di una teoria semplice e onnicomprensiva, è il santo Graal. Einstein cominciò a scrivere sulla connessione tra forze molecolari (elettriche) e gravità nel 1901, a ventidue anni, e dal 1925 fino alla morte, nel 1955, cercò invano una forza elettromagnetico-gravitazionale unificata: questo immenso sforzo di uno dei maggiori fisici di quel tempo, anzi di ogni tempo, fallì. Oggi sappiamo che esistono altre due interazioni, la debole e la forte; e senza di esse il tentativo unificatore di Einstein era condannato. La seconda grande ragione del suo insuccesso fu il rifiuto della principale conquista della fisica del XX secolo, la teoria quantistica (alla quale, mentre era ancora in fase di formazione, egli aveva dato un grande contributo). Einstein non accettò mai i concetti radicalmente rivoluzionari di questa teoria, che di fatto fornivano l'impianto di base di un'unificazione di tutte le forze. Negli anni Sessanta tre delle quattro interazioni erano già state riformulate in termini di teoria quantistica dei campi e affinate al punto che la richiesta di un'unificazione diventava spasmodica.

Tutti i teorici più profondi le davano la caccia. Ricordo un seminario all'Università della Columbia, nei primi anni Cinquanta, in cui Heisenberg e Pauli presentarono la loro nuova teoria unificata delle particelle elementari. La stanza era affollatissima; nelle prime file c'erano Niels Bohr, I.I. Rabi, Charles Townes, T.D. Lee, Polykarp Kusch, Willis Lamb e James Rainwater, i premi Nobel presenti e futuri. Gli specializzandi (quelli che erano riusciti a farsi invitare) erano presenti in spregio a tutte le norme antincendio; gli studenti degli ultimi anni pendevano da uncini che loro stessi avevano attaccato alle travi del soffitto. Insomma, c'era folla. La teoria mi passò sopra la testa, ma il fatto che io non la capissi non significava che fosse corretta. Pauli, alla fine, fece un'ammissione: «Sì, questa è una teoria pazzesca». Ma la risposta di Bohr dalle file del pubblico, che tutti ricordano, diceva più o meno: «Il guaio di questa teoria è che non è abbastanza pazzesca». E poiché quel tentativo finì nel nulla, come molti altri altrettanto valorosi, egli aveva di nuovo ragione.

Una teoria delle interazioni che sia coerente deve soddisfare due criteri: essere una teoria quantistica dei campi e incorporare la relatività ristretta e la simmetria di gauge. È quest'ultima caratteristica – e, per quel che ne sappiamo, nessun'altra – a garantire che la teoria sia matematicamente coerente, ovvero rinormalizzabile. Ma non è tutto; infatti la simmetria di gauge ha un profondo fascino estetico. L'idea

viene, curiosamente, dalla sola forza che non sia ancora stata riformulata come teoria quantistica dei campi, la gravità. La gravità einsteiniana, ben distinta da quella newtoniana, è stata generata dal desiderio di leggi fisiche che fossero uguali per tutti gli osservatori, in quiete o su sistemi accelerati e caratterizzati da campi gravitazionali, come la superficie della Terra, che gira a circa 1700 chilometri all'ora. In questo laboratorio vorticante si manifestano delle forze che danno agli esperimenti risultati molto diversi da quelli che avrebbero in un laboratorio non accelerato, ma Einstein cercava leggi che apparissero uguali a *tutti* gli osservatori; tale requisito dell'«invarianza», da lui imposto alla teoria della relatività generale (1915), implicava logicamente l'esistenza della forza gravitazionale. L'ho detto in quattro e quattr'otto, ma ho faticato moltissimo a capirlo! La teoria della relatività possiede una simmetria intrinseca che implica l'esistenza di una forza naturale: in questo caso, della gravità.

Analogamente, anche la simmetria di gauge, che implica l'imposizione di un'invarianza più astratta alle equazioni pertinenti, genera, a seconda dei casi, l'interazione debole, quella forte e quella elettromagnetica.

Il gauge

Stiamo per imboccare la via privata che porta alla particella di Dio, e dobbiamo richiamare diverse idee. La prima ha a che fare con le particelle materiali, cioè i quark e i leptoni, che hanno tutte uno spin di 1/2 (misurato nelle curiose unità quantiche dello spin). Poi ci sono i campi di forza, rappresentabili anch'essi per mezzo di particelle – i quanti del campo – che stavolta hanno spin 1, quindi intero: si tratta semplicemente delle particelle messaggere e dei bosoni «gauge» dei quali abbiamo parlato tanto spesso: il fotone, le particelle W e Z, i gluoni, tutti già scoperti e con masse misurate. Per dare un senso a questo cumulo di particelle materiali e vettori di interazioni riconsideriamo i concetti di invarianza e simmetria.

Abbiamo ballato il tip tap intorno a questa idea di simmetria di gauge perché spiegarla in modo completo è difficile, e forse impossibile. Il problema è che questo libro è scritto in italiano, mentre il linguaggio della teoria di gauge è matematico. In italiano dobbiamo affidarci alle metafore, cioè di nuovo a dei passi di tip tap, ma forse serviranno.

Una sfera, per esempio, ha una simmetria perfetta perché possiamo ruotarla di un angolo qualsiasi intorno a un asse senza produrre

nessun cambiamento nel sistema. L'atto della rotazione può essere descritto matematicamente; dopo la rotazione possiamo caratterizzare la sfera con un'equazione che è identica, fino ai minimi particolari, all'equazione valida prima della rotazione. La simmetria della sfera determina l'invarianza delle equazioni che descrivono la sfera rispetto alla rotazione.

Ma che ci importa delle sfere? Anche lo spazio vuoto è invariante rispetto alle rotazioni, come la sfera; perciò dovranno esserlo pure le equazioni della fisica. Matematicamente questo significa che, se ruotiamo un sistema di coordinate x, y, z di un angolo qualsiasi intorno a un asse qualsiasi, quell'angolo non comparirà nelle equazioni. Abbiamo già discusso altre simmetrie come questa: un oggetto posto su una superficie piatta infinita, per esempio, può essere spostato di qualsiasi distanza in qualsiasi direzione e il sistema resterà identico (invariante rispetto) alla situazione esistente prima del moto. Questo spostamento dal punto A al punto B è detto traslazione, e noi consideriamo lo spazio invariante anche rispetto alle traslazioni: se aggiungiamo 12 metri a tutte le distanze, questo 12 scomparirà dalle equazioni. Perciò le equazioni della fisica – prosegue la litania – dovranno essere invarianti rispetto alle traslazioni. E per completare questa storia della conservazione della simmetria, abbiamo anche la legge di conservazione dell'energia; ma la simmetria alla quale essa è associata ha a che fare, curiosamente, con il tempo, ovvero con il fatto che le leggi fisiche sono invarianti rispetto alle traslazioni nel tempo. Questo significa che se nelle equazioni della fisica, ogni volta che vi figura il tempo, aggiungiamo un intervallo costante – per esempio di 15 secondi – l'aggiunta si cancellerà da sé, lasciando l'equazione invariante rispetto a questo cambiamento.

Ma andiamo al sodo. La simmetria rivela nuovi aspetti della natura dello spazio. Ora, in uno dei capitoli precedenti ho accennato a Emmy Noether, e la cosa che la Noether stabilì nel 1918 è questa: a ogni simmetria (che si manifesta come incapacità delle equazioni fondamentali di tener conto, per esempio, delle rotazioni e traslazioni spaziali e delle traslazioni temporali) corrisponde una legge di conservazione. Ma le leggi di conservazione possono essere controllate sperimentalmente; e la Noether collegò l'invarianza rispetto alle traslazioni alla legge (molto ben confermata) della conservazione del momento, l'invarianza rispetto alle rotazioni alla conservazione del momento angolare e l'invarianza temporale alla conservazione dell'energia. Ma, se ragioniamo a ritroso, queste leggi, sperimental-

mente inattaccabili, ci parlano delle simmetrie rispettate dal tempo e dallo spazio.

La conservazione della parità discussa nell'interludio C è un esempio di simmetria discreta valida in ambito quantistico microscopico. La simmetria speculare equivale, letteralmente, a una riflessione allo specchio di tutte le coordinate di un sistema fisico; matematicamente, non è che una trasformazione di tutte le coordinate z in $-z$, dove z punta in direzione dello specchio. Abbiamo già visto che l'interazione forte e quella elettromagnetica rispettano questa simmetria, ma quella debole no, il che naturalmente ci diede, nel lontano 1957, una gioia infinita.

Fin qui la materia è stata, per la maggior parte, di ripasso, e la classe mi segue bene (me lo sento). Nel capitolo VII abbiamo visto che possono esistere simmetrie più astratte che non hanno a che fare con la geometria, dalla quale dipendevano gli esempi fatti finora; e la migliore delle nostre teorie quantistiche dei campi, la QED, è invariante rispetto a un cambiamento davvero spettacolare della descrizione matematica, non una rotazione, traslazione o riflessione speculare, ma un cambiamento molto più astratto della descrizione del campo. Sto parlando delle cosiddette «trasformazioni di gauge»; ma una descrizione più dettagliata non può valere le angosce matematiche che produrrebbe. Basterà dire, appunto, che le equazioni dell'elettrodinamica quantistica (QED) sono invarianti rispetto alle trasformazioni di gauge. È una simmetria molto potente, sufficiente, anche da sola, a derivare tutte le proprietà dell'interazione elettromagnetica. Non che storicamente le cose siano andate così, ma alcuni dei manuali per studenti degli ultimi anni delineano proprio questa derivazione. La simmetria garantisce una massa zero al vettore dell'interazione, che è il fotone; e poiché l'essere privo di massa è collegato alla simmetria di gauge, il fotone è detto bosone «gauge» (ricordiamo che sono dette bosoni le particelle, spesso messaggere, con spin intero). E dato che abbiamo dimostrato che la QED, l'interazione forte e quella debole sono descritte da equazioni che possiedono una simmetria di gauge, *tutti* i vettori di interazioni – fotoni, particelle W e Z, gluoni – sono detti bosoni «gauge».

Il trentennale e vano sforzo di Einstein di trovare una teoria unificata è stato superato verso la fine degli anni Sessanta da Glashow, Weinberg e Salam, che sono riusciti a unificare l'interazione debole e quella elettromagnetica. La principale conseguenza della teoria era l'esistenza di una famiglia di particelle messaggere: fotone, W^+, W^- e Z^0.

E adesso arriva il tema della particella di Dio. Come inserire le particelle W e Z, così pesanti, in una teoria di gauge? Com'è che oggetti così diversi come il fotone, che ha massa zero, e le pesanti W e Z figurano nella stessa famiglia? L'enorme differenza delle loro masse spiega il comportamento molto diverso dell'interazione elettromagnetica e di quella debole.

Torneremo a questa stuzzicante introduzione più avanti; troppa teoria mi esaurisce, spiritualmente. Oltretutto, prima che i teorici possano cominciare a rispondere a simili domande dobbiamo trovare le particelle W; come se quelle aspettassero.

Trovate le particelle W

Così il CERN mise a disposizione i soldi (più esattamente, li diede a Carlo Rubbia) e la ricerca delle particelle W cominciò. È da notare che se una di queste particelle ha una massa di circa 100 GeV, bisogna avere un'energia di collisione molto superiore a questo valore. Un protone accelerato a 400 GeV che ne urti uno a riposo non può produrre una particella W perché solo 27 GeV sono disponibili per la formazione di nuove particelle; il resto dell'energia se ne va per conservare il momento. Fu per questo che Rubbia propose di tentare con un collisore; voleva costruire una fonte di antiprotoni, usando l'iniettore del Super Protosincrotrone (SPS) da 400 GeV del CERN per fabbricare questi pi meno. Una volta che ne avesse ottenuto un numero adeguato, li avrebbe immessi nell'anello magnetico dell'SPS, più o meno come abbiamo spiegato nel capitolo VI.

A differenza del Tevatron, più recente, l'SPS non era un acceleratore superconduttore, e di conseguenza la sua energia massima era limitata. Se si acceleravano fino alla sua energia limite di 400 GeV entrambi i fasci, quello dei protoni e quello degli antiprotoni, si avevano a disposizione 800 GeV, un valore enorme; l'energia prescelta, però, fu di 270 GeV per fascio. Perché non 400? Innanzitutto, per arrivarci i magneti, durante le collisioni, avrebbero dovuto portare una corrente ad alta tensione per molto tempo, ore e ore; ma non erano stati progettati per questo lavoro, e si sarebbero surriscaldati. E in secondo luogo, reggere a lungo un'alta intensità di campo è costoso. I magneti dell'SPS erano stati progettati per far salire rapidamente i loro campi fino all'energia massima di 400 GeV, restarci per pochi secondi, durante i quali fornivano dei fasci di particelle ai clienti che facevano esperimenti con bersagli fissi, e poi ridurre il campo a zero. L'idea di Rubbia – fare scontrare due fasci – era inge-

gnosa, ma il problema fondamentale era che la sua macchina, in origine, non era stata progettata come collisore.

Le autorità del CERN condividevano con Rubbia l'idea che probabilmente 270 GeV per fascio – con un'energia totale di 540 GeV – sarebbero bastati per fabbricare le particelle W, che «pesano» solo 100 GeV circa. Nel 1978 il progetto fu approvato e venne stanziata un'adeguata quantità di franchi svizzeri. Rubbia mise insieme due squadre: la prima era un gruppo di geni degli acceleratori – francesi, italiani, olandesi, inglesi, norvegesi e ogni tanto qualche yankee in visita – che parlavano un inglese pietoso ma un «acceleratorese» impeccabile. La seconda, formata da fisici sperimentali, doveva costruire un massiccio rivelatore, battezzato UA-1 con un volo di fantasia poetica, per osservare le collisioni fra protoni e antiprotoni.

Nel gruppo dell'acceleratore di pi meno c'era un ingegnere olandese, Simon Van der Meer, che aveva inventato un modo per comprimere gli antiprotoni in uno spazio ridotto entro l'anello di immagazzinaggio in cui si accumulano questi oggetti così rari. Questa invenzione (il cosiddetto «raffreddamento stocastico») fu decisiva per ottenere i pi meno necessari per realizzare un numero rispettabile di collisioni pi/pi meno (circa 50.000 al secondo). Rubbia, che è un tecnico superbo, incitava il gruppo, curava il suo collegio elettorale, si occupava della commercializzazione, delle chiamate di collaboratori e della propaganda. La sua tecnica era «Parla, parla e la cosa camminerà». Le sue presentazioni erano in stile mitraglia, con cinque lucidi al minuto sulla lavagna luminosa e un miscuglio inestricabile di adulazione, vanteria, grosse sparate e sostanza.

Carlo e il gorilla

Per molti fisici Carlo Rubbia è uno scienziato di levatura eccezionale. Una volta toccò a me presentarlo, prima che tenesse un discorso al pranzo ufficiale di un affollato congresso internazionale a Santa Fe (aveva già vinto il premio Nobel per la scoperta delle particelle W e Z), e lo feci raccontando una storia.

Alla cerimonia di conferimento dei premi Nobel, a Stoccolma, re Gustavo prende Carlo da parte e gli spiega che c'è un problema: a causa di un taglio dei fondi, quest'anno è disponibile una sola medaglia, e per decidere quale dei premiati dovrà averla il re ha ideato tre cimenti eroici che dovranno essere affrontati in tre tende da campo, visibili a tutta l'assemblea. Nella prima tenda Carlo troverà quattro litri di slivoviz ad alta gradazione (il liquore che ha contribuito alla disfatta della Bulgaria). Ha 20 secondi per berlo. Nella seconda tenda c'è un gorilla digiuno da tre giorni che sta male per via di un dente del giudizio cariato. Compito: togliere il dente dolorante. Tempo: 40 secondi. La terza tenda nasconde la cortigiana più esperta dell'esercito iracheno. Compito: soddisfarla completamente. Tempo: 60 secondi.

Al colpo di pistola, Carlo balza nella prima tenda. Tutti sentono il gorgoglio, e dopo 18,6 secondi quattro bottiglie di slivoviz da un litro, vuote, vengono trionfalmente presentate al pubblico.

Senza perdere tempo il mitico Carlo entra traballando nella seconda tenda. Tutti sentono dei ruggiti colossali, anzi assordanti. Dopo 39,1 secondi, Carlo esce barcollando, si trascina sino al microfono e chiede: «Be', dov'è il g-g-gorilla col m-mal di denti?».

Il pubblico, forse perché il vino era stato servito in abbondanza, mostrò rumorosamente di apprezzare la storia. Finalmente presentai Carlo, che, mentre mi passava accanto per andare al podio, mi sussurrò: «Non ho capito. Dopo mi spieghi».

Rubbia non aveva pazienza con gli stupidi, e l'energia con cui dirigeva la baracca scatenò dei risentimenti. Poco dopo i suoi grandi successi Gary Taubes scrisse su di lui un libro, *Nobel Dreams*, in cui non lo trattava molto bene. Un giorno, a una scuola invernale (fra il pubblico c'era anche Carlo), annunciai che i diritti cinematografici del libro erano stati venduti e che per la parte di Carlo era stato scritturato Sidney Greenstreet, che aveva più o meno il suo stesso giro di vita; qualcuno fece notare che Greenstreet era morto, ma a parte questo era un'ottima scelta. In un'altra occasione, a una conferenza estiva a Long Island, qualcuno portò in spiaggia un cartello: VIETATO BAGNARSI. CARLO STA USANDO L'OCEANO.

Rubbia spinse a fondo in tutte le direzioni alla ricerca delle particelle W. Faceva continuamente fretta ai costruttori del rivelatore, che stavano montando il mostruoso magnete destinato a rivelare e analizzare eventi con cinquanta o sessanta particelle che emergevano da collisioni frontali di protoni e antiprotoni, gli uni e gli altri di 270 GeV; era attivo e competente anche nella costruzione dell'accumulatore di antiprotoni, o anello AA, il congegno che doveva mettere in pratica l'idea di Van der Meer e produrre una generosa fonte di antiprotoni da immettere e accelerare nell'anello dell'SPS. L'anello doveva avere cavità a radiofrequenza, un raffreddamento ad acqua migliorato e una stanza di interazione con apparecchiature speciali in cui sarebbe stato montato il rivelatore UA-1. Le autorità del CERN approvarono anche un rivelatore rivale, UA-2, come polizza di assicurazione (e per contenere le richieste di Rubbia). L'UA-2 era, decisa-

mente, l'Avis della situazione, ma il gruppo che lo costruiva era fatto di gente giovane ed entusiasta che, dovendo fare i conti con fondi più modesti, progettò un rivelatore completamente diverso.

Sul terzo fronte, Rubbia teneva in vita l'entusiasmo dei dirigenti del CERN, stuzzicava la comunità mondiale e preparava la scena per il grande esperimento delle particelle W. Tutta l'Europa sbavava per questo esperimento, il cui significato era che la scienza del Vecchio Mondo era diventata maggiorenne. Un giornalista arrivò a dire che un insuccesso avrebbe distrutto «papi e primi ministri».

L'esperimento partì nel 1981. Tutto era al suo posto – UA-1, UA-2, anello AA –, controllato e pronto. Le prime prove, che avevano la funzione di verificare tutte le parti di quel complesso sistema di collisore e rivelatore, furono abbastanza fruttuose. Ci furono delle perdite, degli errori, degli incidenti... ma alla fine anche dei dati! E a un nuovo livello di complessità. La conferenza Rochester del 1982 si doveva tenere a Parigi, e al CERN lavorarono a corpo morto per ottenere dei risultati.

Ironicamente fu l'UA-2, il rivelatore di riserva, a fare centro per primo osservando dei getti, quei fasci compatti di adroni che sono la firma dei quark. L'UA-1 stava ancora imparando, e mancò la scoperta. Quando Davide batte Golia tutti sono contenti, a parte Golia; e in quel caso Rubbia, il quale odia perdere, riconobbe che l'osservazione di quei getti era un vero trionfo per il CERN, che tutto quello sforzo in termini di macchine, rivelatori e software era ripagato da un'indicazione molto forte. Tutto funzionava! E se si vedevano i getti, presto si sarebbero viste le particelle W.

Un viaggio sulla n. 29

Forse il miglior modo di spiegare come funzionano i rivelatori è un viaggio fantastico; ma qui passo al CDF del Fermilab, perché è più moderno dell'UA-1, anche se l'idea generale di tutti i rivelatori «quattro pi greco» è la stessa (quattro pi greco, o 4π, significa che il rivelatore circonda completamente il punto della collisione). Ricordiamo che quando si scontrano un protone e un antiprotone ne proviene una pioggia di particelle in tutte le direzioni; in media sono neutre per un terzo e cariche per due terzi. Il nostro compito è quello di scoprire dove va a finire, esattamente, ognuna di queste particelle e che cosa fa; ma possiamo raggiungere solo un successo parziale, come in tutte le osservazioni fisiche.

Mettiamoci su una particella, quella, poniamo, della traccia n. 29.

Esce dalla linea di collisione a un certo angolo, incontra la sottile parete metallica del contenitore sotto vuoto (il tubo dove viaggiano i fasci), l'attraversa calma e fresca e poi fa circa mezzo metro in un gas che contiene un numero immenso di fili d'oro sottilissimi: territorio Charpak, anche se non c'è nessun cartello. La particella può passare vicinissima a quaranta o cinquanta di questi fili prima di arrivare alla fine della camera di tracciamento; e se è carica ognuno dei fili che sfiora ne registra il passaggio, insieme a una stima della distanza minima. Le informazioni ottenute dai fili definiscono il suo percorso; e poiché la camera proporzionale a fili si trova in un intenso campo magnetico, il percorso di una particella carica sarà incurvato, e una misurazione di questa curvatura, calcolata dal computer di bordo, darà ai fisici il momento della particella n. 29.

Poi la n. 29 attraversa la parete cilindrica che delimita la camera magnetica a fili, passa in un «settore calorimetrico» che ne misura l'energia, e da questo momento il suo comportamento dipende dal tipo di particella che è. Se è un elettrone, si frammenta su una serie di sottili dischi di piombo che si succedono a brevi intervalli, cedendo tutta la sua energia a dei rivelatori molto sensibili, che forniscono la carne a questi sandwich di piombo. Il computer osserva che dopo otto-dieci centimetri di calorimetro-scintillatore al piombo la particella non avanza più e conclude: «elettrone»! Se invece la n. 29 è un adrone, attraversa da venticinque a cinquanta centimetri di materiale calorimetrico prima di esaurire la propria energia. Quest'ultima viene misurata in tutti i casi, e poi si fa un controllo incrociato con la misurazione del momento, determinata dalla curvatura della particella nel magnete. Ma il computer lascia ai fisici, molto cortesemente, ogni decisione.

Se la n. 29 è una particella neutra, la camera di tracciamento non registra nulla. Quando arriva al calorimetro, il suo comportamento è sostanzialmente identico a quello di una particella carica. In ambedue i casi la particella produce collisioni nucleari con il materiale del calorimetro, e i detriti altre collisioni fino a che l'energia originale è esaurita. Così possiamo registrare e misurare le particelle neutre, ma non possiamo misurare il momento, e solo imprecisamente la direzione, perché non lasciano traccia nella camera proporzionale a fili. Una particella neutra, il fotone, può essere facilmente identificata perché rapidamente assorbita dal piombo, come l'elettrone. Il neutrino lascia il rivelatore intatto, con tutta la sua energia e il suo momento, senza lasciare dietro di sé neppure il sentore della sua fragranza. Infine, il muone passa attraverso il calorimetro lasciando

una piccola quantità d'energia (esso non ha collisioni nucleari forti). Quando emerge, trova da ottanta centimetri a un metro e mezzo d'acciaio, attraverso i quali passa solo per trovare un rivelatore di muoni, camere proporzionali a fili o contatori a scintillazione. Così anche i muoni vengono etichettati.

Si fa tutto questo per quarantasette particelle, o quale che sia il loro numero, per ogni particolare ripetizione dell'evento. Il sistema immagazzina i dati, qualcosa come un milione di bit di informazioni – equivalenti a un libro di cento pagine – per ogni evento. Il sistema di raccolta dei dati deve rapidamente decidere se questo evento è interessante oppure no; se deve cancellarlo o registrarlo, oppure passarlo in una memoria temporanea e ripulire tutta la sua memoria di lavoro per essere pronto per un nuovo evento. Se la macchina lavora bene, questo inizia dopo un milionesimo di secondo, in media. Nel più recente ciclo di esperimenti condotto al Tevatron (1990-91), l'ammontare totale di informazione immagazzinata sui nastri magnetici del rivelatore CDF era equivalente al testo di un milione di romanzi oppure a cinquemila copie dell'Enciclopedia Britannica.

Fra le particelle in uscita ce ne sono alcune di vita molto breve. Queste possono allontanarsi solo per pochi millimetri dal punto di collisione nel condotto di fascio, prima di disintegrarsi spontaneamente. Le particelle W e Z sono così caduche che il loro percorso non è misurabile, e la loro esistenza deve essere dedotta dalle misurazioni delle particelle a cui danno origine. Queste sono spesso nascoste nei detriti di ogni collisione. Dal momento che W ha una grande massa, i prodotti del suo decadimento hanno un'energia più alta della media, il che aiuta a localizzarli. Oggetti esotici come un quark «alto» o una particella di Higgs avranno un insieme di modi di decadimento attesi che deve essere estratto dal guazzabuglio di particelle emergenti.

Il processo di convertire numeri enormi di bit di dati elettronici in conclusioni circa la natura delle collisioni richiede sforzi impressionanti. Decine di migliaia di segnali devono essere controllati e calibrati; decine di migliaia di linee di codice devono essere ispezionate e verificate guardando a eventi che devono «avere un senso». Non c'è da meravigliarsi che ci voglia un battaglione di studiosi altamente preparati e motivati (anche se ufficialmente possono essere solo dottorandi o borsisti), armati di poderose stazioni di lavoro e ben affilati codici di analisi, e due o tre anni di attività per trattare tutti i dati raccolti in un solo ciclo di esperimenti del Tevatron.

Vittoria!

Al CERN, dove erano dei pionieri della fisica delle collisioni, tutto funzionò bene, convalidando il progetto. Nel gennaio 1983 Rubbia annunciò la scoperta di W. Il segnale era dato da cinque chiari eventi che potevano essere interpretati solamente come la produzione e susseguente disintegrazione di un oggetto W.

Un giorno dopo o giù di lì, l'UA-2 annunciò che aveva altri quattro eventi. In ambedue i casi, gli sperimentatori dovevano scandagliare circa un milione di collisioni che producevano ogni genere di detriti nucleari. Come può uno convincere se stesso, oltre alla moltitudine degli scettici? Il modo di decadimento di W più propizio alla scoperta è $W^+ \rightarrow e^+ +$ neutrino, o $W^- \rightarrow e^- +$ antineutrino. In un'analisi dettagliata di questo tipo di evento si deve verificare (1) che la singola traccia osservata sia effettivamente un elettrone e non qualcos'altro, e (2) che l'energia dell'elettrone assommi all'incirca a metà della massa di W. Il «momento mancante», che il neutrino invisibile porta via con sé, può essere dedotto sommando tutti i momenti registrati nell'evento e comparandoli a «zero», che è il momento dello stato iniziale delle particelle che entrano nella collisione. La scoperta fu grandemente facilitata dal fortunato accidente per cui le particelle W erano prodotte quasi in quiete sotto i parametri del collisore del CERN. Per scoprire una particella, devono essere soddisfatti un mucchio di vincoli. Un'importante condizione è che tutti gli eventi candidati attribuiscano lo stesso valore alla massa di W (nell'ambito degli errori di misurazione ammessi).

A Rubbia toccò l'onore di presentare i suoi risultati alla comunità scientifica del CERN e, contrariamente al suo solito, era nervoso; erano i risultati di otto anni di lavoro. La sua conferenza fu uno spettacolo. Lui aveva tutte le qualità di uno showman per presentarli con logica e passione. Anche i detrattori di Rubbia applaudirono e l'Europa ebbe il suo premio Nobel, giustamente dato al fisico italiano e a Van der Meer nel 1984.

Sei mesi dopo il successo relativo a W, apparve la prima evidenza a favore dell'esistenza del suo partner neutro, la particella Z zero. Con carica zero, essa decade, fra le altre possibilità, in un e^+ ed un e^- (o un paio di muoni, μ^+ e μ^-). Perché? Per coloro che si fossero addormentati leggendo il precedente capitolo, ricordiamo che, dal momento che Z è neutra, le cariche dei suoi prodotti di decadimento devono cancellarsi a vicenda, così che particelle di segno opposto risultano i logici prodotti del suo decadimento. Poiché sia le coppie di elettroni sia le coppie di muoni possono essere misurate con preci-

sione, Z^0 è una particella più facile da riconoscere rispetto a W. Il guaio è che Z^0 è più pesante di W, e ne sono prodotte poche. Nondimeno, per la fine del 1983 Z^0 venne scoperta sia dall'UA-1 sia dall'UA-2. Con la scoperta di W e di Z^0 e la determinazione che le loro masse erano esattamente quelle previste, la teoria elettrodebole – che unificava l'elettromagnetismo e l'interazione debole – veniva saldamente confermata.

Arriviamo al top del modello standard

Nel 1992, decine di migliaia di W sono state osservate dai rivelatori UA-1, UA-2 e dal nuovo nato, il CDF del Tevatron al Fermilab. Adesso si sa che la massa di W è circa 79,31 GeV. Circa due milioni di Z^0 sono state collezionate dalla «fabbrica di Z^0» del CERN, il LEP (*Large Electron-Positron Storage Ring*, grande anello di accumulazione per elettroni e positroni), un acceleratore di elettroni della circonferenza di ventisette chilometri. La massa di Z^0 è 91,175 GeV.

Alcuni acceleratori sono diventati fabbriche di particelle. Le prime – Los Alamos, Vancouver, Zurigo – producevano pioni. Il Canada sta attualmente progettando una fabbrica di kaoni. La Spagna ne vuole una di tau «incantati». Ci sono altre tre o quattro proposte in circolazione per la produzione del quark «basso» (o «bellezza»), e la fabbrica di Z^0 del CERN è, nel 1992, in piena attività. Allo SLAC un più piccolo progetto per Z^0 potrebbe essere più propriamente chiamato un atelier, o una boutique.

Perché delle fabbriche? Il processo di produzione può essere studiato dettagliatamente e, specialmente per le particelle di massa maggiore, ci sono molti modi di decadimento. Si vogliono campioni di molte migliaia di eventi per ciascun modo. Nel caso di Z^0 c'è un gran numero di modi, dai quali si possono imparare molte cose sulle interazioni deboli ed elettrodeboli. Si impara qualcosa anche da quello che non c'è. Per esempio, se la massa del *top quark*, il quark «alto», è inferiore alla metà di quella di Z^0, allora abbiamo (obbligatoriamente) $Z^0 \rightarrow$ quark «alto» + antiquark «alto». Vale a dire, una particella zeta zero può decadere, sebbene ciò sia raro, in un mesone, composto di un quark «alto» legato al rispettivo antiquark. È molto più probabile che Z^0 decada in una coppia di elettroni o di muoni o in una coppia di quark «bassi», come menzionato. Il successo della teoria nel prevedere queste coppie ci incoraggia a credere che il decadimento di Z^0 nella coppia costituita dal quark «alto» con il rispettivo antiquark sia pronosticabile. Diciamo anzi che è obbligatorio, dato il carattere totalitario delle regole della fisica. Se produciamo abbastanza Z^0, allora dovremmo vedere dei segnali del quark «alto», secondo le probabilità della teoria quantistica. Eppure nei milioni di Z^0 prodotte dal CERN, dal Fermilab e altrove, non abbiamo ancora riscontrato questo particolare modo di decadimento. Questo ci dice qualcosa di importante attorno al quark «alto», che deve essere più pesante della metà della massa di Z^0. Per questo motivo Z^0 non può produrlo.

Di che cosa stiamo parlando?

Uno spettro molto ampio di ipotetiche particelle è stato proposto dai teorici che seguono l'una o l'altra pista per la riunificazione delle forze. Generalmente, le proprietà di queste particelle, eccettuata la massa, sono ben specificate dal modello. Il fatto di non vedere queste particelle «esotiche» provvede un limite inferiore per la loro massa, in base alla regola che più grande essa è, più difficile è produrle.

Qui c'è un po' di teoria di mezzo. Il teorico Lee dice: una collisione pi/pi meno produrrà una particella ipotetica – chiamiamola *Lee-one* – se c'è abbastanza energia nella collisione. La probabilità o la frequenza relativa della produzione del Lee-one dipende però dalla sua massa. Più pesante è, meno frequentemente viene prodotto. Il teorico si preoccupa di esibire un grafico che mette in relazione il numero di Lee-oni prodotti per giorno con la massa della particella. Per esempio: massa = 20 GeV, 1000 Lee-oni; 30 GeV, 2 Lee-oni; 50 GeV, un millesimo di Lee-one. In quest'ultimo caso, bisognerebbe far girare la macchina per 1000 giorni per vedere un evento, e gli sperimentali di solito vogliono almeno dieci eventi, per essere sicuri di non avere problemi collaterali. Così, dopo averla fatta girare per 150 giorni (un anno operativo), durante i quali non sono stati rilevati eventi, si prende il grafico, lo si segue fino al punto in cui compaiono dieci eventi, corrispondenti a una massa, diciamo, di 40 GeV per Lee-one. Una stima prudente è che cinque eventi possono essere sfuggiti ai rivelatori. Perciò la curva ci dice che, se la massa fosse di 40 GeV, avremmo dovuto notare un debole segnale di pochi eventi. Ma non abbiamo visto niente. Conclusione: la massa è superiore a 40 GeV.

E dopo che cosa succede? Se il Lee-one o il quark «alto» o la particella di Higgs vale la candela, si può scegliere fra tre strategie. La prima, far girare la macchina ancora più a lungo, ma ciò è veramente difficile. La seconda, ottenere più collisioni al secondo; vale a dire, aumentare la luminosità. È esattamente ciò che il Fermilab sta facen-

do in questi anni Novanta, con l'obiettivo di aumentare il tasso di collisioni di circa un centinaio di volte. Fino a quando ci sia abbastanza energia nella collisione (e 1,8 TeV è abbastanza), aumentare la luminosità aiuta. La terza strategia è quella di aumentare l'energia della macchina, il che accresce la probabilità di produrre particelle pesanti. E questa è la strada del Super Collisore.

Con la scoperta delle particelle W e Z, abbiamo identificato sei quark, sei leptoni e dodici bosoni «gauge» (particelle messaggere). C'è dell'altro nel modello standard con cui non abbiamo ancora fatto i conti, ma prima di affrontare quel mistero, dobbiamo affaticarci ancora un po' su questo schema teorico. Scriverlo in termini di tre generazioni di particelle indica una certa direzione. Ce ne sono anche altre. Le generazioni più alte sono più pesanti, il che vuol dire molto nel nostro freddo mondo di oggi, ma non altrettanto quando il mondo era giovane e molto caldo. Tutte le particelle in un universo molto giovane avevano enormi energie, miliardi di TeV, di modo che una piccola differenza nella massa a riposo di un quark «basso» e di un quark «alto» non avrebbe voluto dir molto. Tutti i quark, i leptoni e così via erano una volta sullo stesso piano: per qualche motivo l'Onnipotente aveva bisogno di tutti loro e voleva loro bene allo stesso modo. Perciò dobbiamo prenderli tutti sul serio.

I dati sulle Z^0 al CERN suggeriscono un'altra conclusione: è molto improbabile che ci sia una quarta o una quinta generazione di particelle. Perché? Che cosa autorizza questi scienziati che lavorano in Svizzera, fra montagne imbiancate di neve, laghi ed eccellenti ristoranti, a fare questa proibizione?

C'è un bell'argomento a favore. La Z^0 ha molti modi di decadimento, e ciascun modo, ogni possibilità, accorcia di un pochino la sua vita. È come se molte malattie, nemici, rischi vari, accorciassero la vita umana. Ma questa è un'analogia un po' iettatrice. Diciamo che ciascuna opportunità di decadimento apre a una via per raggiungere la pace eterna. La somma totale di tutte queste vie determina il tempo di vita. Si noti che non tutte le Z^0 hanno la stessa massa. La teoria dei quanti ci dice che, se una particella è instabile – non vive per sempre –, allora la sua massa deve essere in certa misura indeterminata. Le relazioni di Heisenberg ci dicono come la durata influisce sulla distribuzione della massa: vita lunga, distribuzione concentrata; vita breve, distribuzione ampia. In altri termini, più breve è la vita, meno determinata è la massa e più ampio lo spettro dei possibili valori. I teorici possono fortunatamente fornirci una formula per la relazione. L'ampiezza della distribuzione è facile da

misurare se avete un sacco di Z^0 e un centinaio di milioni di franchi svizzeri per costruire un rivelatore.

Il numero di Z^0 prodotte è zero se la somma delle energie degli e^+ ed e^- alla collisione è significativamente inferiore a 91,175 GeV, la massa media delle Z^0. L'operatore alza l'energia della macchina fino a che un basso conteggio di Z^0 viene registrato da ciascuno dei rivelatori. Se si incrementa l'energia della macchina, cresce anche il conteggio. È una ripetizione dell'esperimento J/psi allo SLAC, ma qui l'ampiezza è di circa 2,5 GeV; vale a dire, c'è un picco nel conteggio a 91,175, che decresce a circa la metà da ambo i lati, a 89,9 GeV e a 92,4 GeV. (Se vi ricordate, l'ampiezza, nel caso di J/psi, era molto minore: circa 0,05 MeV.) La curva a campana ci dà un'ampiezza, che è in effetti un tempo di vita. Ogni possibile modo di decadimento di Z^0 diminuisce la sua durata di vita e aumenta l'ampiezza di circa 0,2 GeV.

Che cosa ha a che fare questo con una quarta generazione? Notiamo che ciascuna delle tre generazioni ha un neutrino a bassa massa (o addirittura zero). Se c'è una quarta generazione con un neutrino a bassa massa, allora Z^0 deve includere, come uno dei suoi modi di decadimento, il neutrino ν_x e il suo antineutrino $\bar{\nu}_x$ di questa generazione. Questa possibilità aggiungerebbe 0,17 GeV all'ampiezza. L'ampiezza della distribuzione della massa di Z^0 è stata perciò attentamente studiata. Ed è risultata essere esattamente quella che il modello standard delle tre generazioni aveva previsto. I dati sull'ampiezza di Z^0 escludono l'esistenza di un neutrino a bassa massa di quarta generazione. Tutti i quattro esperimenti del LEP hanno concordato sul fatto che i loro dati permettevano soltanto tre paia di neutrini. Una quarta generazione con la stessa struttura delle altre tre, con un neutrino a massa bassa o zero, è esclusa dai dati sulla produzione di Z^0.

Detto di passaggio, alla stessa rimarchevole conclusione erano giunti i cosmologi anni addietro. Essi si basavano sul modo in cui si dovevano essere combinati i neutroni e i protoni per formare gli elementi chimici durante una delle prime fasi dell'espansione e del raffreddamento dell'universo dopo il Big Bang. L'ammontare di idrogeno comparato con l'ammontare di elio dipende (non spiegherò perché) da quante specie di neutrini ci sono, e i dati relativi suggeriscono fortemente l'ipotesi che ce ne siano tre. Così la ricerca del LEP è rilevante per la nostra comprensione dell'evoluzione dell'universo.

Bene, ci ritroviamo con un modello standard quasi completo. Manca solo il quark «alto». Anche il neutrino tauonico, per la verità,

ma questo non è così grave, come abbiamo visto. La gravità deve essere tenuta fuori fino a che i teorici non l'abbiano capita meglio; e, naturalmente, manca la Higgs, la particella di Dio.

La ricerca del top

Un programma televisivo intitolato «La corsa al top» andò in onda nel 1990 quando sia la macchina pi/pi meno del CERN sia la macchina CDF del Fermilab erano operative. Il CDF aveva il vantaggio di un'energia tre volte maggiore, 1,8 TeV contro i 620 GeV del CERN. Al CERN erano riusciti ad alzare l'energia del fascio da 270 GeV a 310 GeV strizzandola fino all'ultima goccia, raffreddando le loro spire di rame un pochino meglio. Tuttavia, un rapporto di tre a uno era un grosso handicap. A favore del CERN giocavano nove anni d'esperienza, un software più sviluppato e il corretto impiego dell'analisi dei dati. Avevano anche rielaborato la fonte degli antiprotoni, sfruttando alcune idee del Fermilab, e il loro tasso di collisioni era leggermente meglio del nostro. Nel 1989-90 il rivelatore UA-1 era andato in pensione. Rubbia era diventato direttore generale del CERN con un occhio di riguardo per il futuro del suo laboratorio, così all'UA-2 venne affidato il compito di trovare il *top quark*, il quark «alto». Un compito secondario era quello di misurare più precisamente la massa di W, perché questo era un parametro cruciale per il modello standard.

Quando il programma venne mandato in onda, in effetti la corsa era già finita, in quanto il CERN era già fuori. Tutti e due i gruppi avevano analizzato l'assenza di un segnale nei termini della massa sconosciuta del *top quark*. Come abbiamo visto, il non trovare una particella vi dice qualcosa sulla sua massa. I teorici sanno tutto sulla produzione di questo genere di quark e su certi canali di decadimento: tutto, meno la massa. La probabilità della sua produzione dipende criticamente dalla massa ignota. Il Fermilab e il CERN furono d'accordo nel fissarne i limiti: la massa del *top quark* era maggiore di 60 GeV.

Il CDF del Fermilab continuò a girare, e piano piano l'energia della macchina cominciò a dare qualche frutto. Quando il collisore cessò di essere operativo, il CDF aveva lavorato per undici mesi e aveva visto più di 100 miliardi (10^{11}) di collisioni, ma nessun *top quark*. L'analisi diede un limite di 91 GeV per la massa, cosa che faceva questo quark almeno diciotto volte più pesante di quello «basso». Questo sorprendente risultato diede un dispiacere a molti teorici dell'unificazione, specialmente a quelli delle forze elettrodeboli. In questi modelli il *top quark* avrebbe dovuto avere una massa molto inferiore, e

ciò condusse molti a guardare a esso con un interesse particolare. Il concetto di massa è legato in qualche modo a Higgs. E se la pesantezza del *top quark* fosse un indizio speciale? Fino a quando non lo avremo trovato, misurato nella sua massa e sottoposto a un terzo grado, non lo possiamo sapere.

I teorici tornarono a far calcoli. Il modello standard rimaneva ancora intatto. In effetti, esso permetteva un *top quark* pesante fino a 250 GeV, ma un peso maggiore avrebbe significato guai per l'impalcatura teorica. Gli sperimentali si rimisero a cercare il *top quark* con gran lena. Ma, con una massa maggiore di 91 GeV, il CERN era fuori gioco: le macchine $e^+ e^-$ non avevano energia sufficiente. Solo il Tevatron del Fermilab poteva farcela. Ma bisognava aumentare il numero delle collisioni da almeno cinque volte a cinquanta volte. Questa è la sfida per gli anni Novanta.

Il modello standard traballa

Io ho una diapositiva che raffigura una divinità in tunica bianca, con tanto di aureola, che guarda una «macchina mondo». Questa macchina ha una ventina di leve, ciascuna delle quali deve essere posizionata su un numero preciso, e un pulsante con sopra scritto PREMERE PER CREARE L'UNIVERSO. (Ho avuto l'idea dal graffito di uno studente sopra l'asciugatore elettrico di un bagno: PREMERE PER RICEVERE UN MESSAGGIO DAL PRESIDE.) L'idea è che una ventina di numeri o giù di lì debbano essere specificati per dare inizio all'universo. Quali numeri (o parametri, come si dice nel gergo della fisica)? Ebbene, dodici numeri per specificare le masse dei quark e dei leptoni. Tre numeri per specificare l'intensità delle forze (un quarto, relativo alla forza di gravità, non fa veramente parte del modello standard, non ancora almeno). Ci servono poi alcuni numeri per mostrare come le forze siano collegate le une alle altre. Poi un numero per far figurare la violazione della simmetria CP, una massa per la particella di Higgs e poche altre sciocchezzuole.

Se abbiamo questi numeri fondamentali, tutti gli altri parametri sono derivabili da essi: per esempio, il 2 della legge dell'inverso del quadrato, la massa del protone, le dimensioni dell'atomo di idrogeno, la struttura di H_2O e della doppia elica (DNA), la temperatura di congelamento dell'acqua, il prodotto nazionale lordo dell'Albania nel 1995. Non ho in realtà la più pallida idea di come ottenere la maggior parte di questi numeri, ma abbiamo questi enormi computer...

La nostra richiesta di semplicità ci porta per la verità a non pren-

dere sul serio la richiesta di specificare venti parametri. Non è così che una divinità seria farebbe la «macchina mondo». Un parametro, o magari due, non di più. Un modo alternativo di esprimere l'idea è che la nostra esperienza del mondo fisico ci induce ad aspettarci un'organizzazione più sobriamente elegante. Questo è il vero problema del modello standard, come abbiamo già avuto occasione di lamentare. Naturalmente c'è ancora un'enorme quantità di lavoro da fare attorno a questi parametri. Il problema è estetico: sei quark, sei leptoni e dodici particelle «gauge» che sono vettori delle forze, e i quark in tre colori, e poi le antiparticelle. E la gravità dietro l'angolo. Dov'è Talete, adesso che abbiamo bisogno di lui?

Perché la gravità è lasciata fuori? Perché nessuno è ancora riuscito a costringere la gravità – la teoria della relatività generale – a uniformarsi alla teoria quantistica. Il soggetto della gravità quantistica è una delle frontiere teoriche degli anni Novanta. Per descrivere l'universo nella sua attuale, grande scala, non c'è bisogno della teoria dei quanti. Ma una volta l'intero universo non era più grande di un atomo; in effetti, era assai più piccolo. La straordinariamente debole forza di gravità era allora intensificata dall'enorme energia delle particelle che formarono tutti i pianeti, le stelle, le galassie di miliardi di stelle, tutta quella massa compressa in uno spazio in confronto al quale un atomo è grande quanto una capocchia di spillo. Le leggi della fisica quantistica devono trovare applicazione in questo primigenio mälström gravitazionale, ma non sappiamo come! Per i teorici, il matrimonio fra la relatività generale e la teoria quantistica è il problema centrale della fisica contemporanea. Le teorie che perseguono questo obiettivo si chiamano «supergravità», «supersimmetria», «superstringhe» o «Teoria del Tutto» (*Theory of Everything*, TOE).

Qui troviamo della matematica piuttosto esotica che fa aggrottare le ciglia di alcuni dei migliori matematici del mondo. Parlano di dieci dimensioni: nove spaziali e una temporale. Noi viviamo in quattro dimensioni: tre spaziali (est-ovest, nord-sud e sopra-sotto) e una temporale. Non riusciamo neanche a intuire più di tre dimensioni spaziali. Nessun problema. Le restanti sei dimensioni sono state «compattate», «arrotolate» in dimensioni piccole al di là di ogni immaginazione e non sono visibili nel mondo che noi conosciamo.

I teorici odierni hanno un obiettivo molto ambizioso: cercano una teoria che descriva un'originaria semplicità nell'intenso calore dell'universo primitivo, una teoria senza parametri. Tutto deve saltar fuori dall'equazione fondamentale; tutti i parametri devono essere fissati dalla teoria. Il guaio è che l'unica teoria che ponga una valida

candidatura non ha collegamenti con il mondo osservabile (non ancora, comunque). Ha un fuggevole istante di applicabilità in un dominio immaginario che gli esperti chiamano «massa di Planck», un dominio dove tutte le particelle dell'universo hanno energie un milione di miliardi di volte maggiori dell'energia del Super Collisore. L'intervallo di tempo in cui durò questo dominio privilegiato si estende per un trilionesimo di un trilionesimo di un trilionesimo di secondo. Subito dopo, la teoria si confonde: troppe possibilità, nessuna indicazione chiara che noi e i pianeti e le galassie fossimo veramente prevedibili.

Nella metà degli anni Ottanta, la «Teoria del Tutto» aveva un tremendo fascino per i giovani fisici teorici. Nonostante il rischio di buttare al vento lunghi anni per un pugno di mosche, essi seguirono le guide (i pifferai magici, qualcuno direbbe) che precedevano alla volta della massa di Planck. Noi che restammo a casa al Fermilab e al CERN non ricevemmo né cartoline né fax. Ma presto arrivò la disillusione. Alcune delle più brillanti reclute della «Teoria del Tutto» disertarono, e presto cominciarono a tornare gli autobus dalla massa di Planck, stipati di teorici frustrati che cercavano qualcosa di concreto da calcolare. La storia non è ancora finita, ma si sono spenti i bollori e tornano a essere battute le strade più tradizionali per l'unificazione.

Queste strade più popolari verso un principio unificante hanno nomi eccellenti: grande unificazione, modelli costituenti, supersimmetria, Technicolor, solo per citarne alcuni. Tutte condividono lo stesso problema: non ci sono dati sperimentali! Queste teorie hanno un ricco bagaglio di previsioni. Per esempio, la supersimmetria – affettuosamente chiamata «Susy»* –, probabilmente la più votata se i teorici votassero (ma non lo fanno), prevede nientemeno che un raddoppio del numero delle particelle. Come ho spiegato, i quark e i leptoni, chiamati collettivamente fermioni, hanno spin 1/2, mentre le particelle messaggere, chiamate collettivamente bosoni, hanno spin 1. Susy rimedia a questa asimmetria postulando un partner bosone per ogni fermione e un partner fermione per ogni bosone. I nomi sono stupendi. Il Susy-partner dell'elettrone è il «selettrone», e i partner dei leptoni sono collettivamente chiamati «sleptoni». I partner dei quark sono gli «squark». Ai partner con spin 1/2 dei bosoni viene dato un suffisso *-ino*, sicché ai gluoni si aggiunge il «gluino», ai fotoni il «fotino», e abbiamo pure il «wino» (partner di W) e lo «zino». I nomi non fanno una teoria, ma questa è popolare.

* Dall'inglese *su(per)sy(mmetry)*. (*NdT*)

La ricerca degli squark e dei wini andrà avanti man mano che il Tevatron incrementerà la sua potenza nel corso degli anni Novanta e le macchine del 2000 diventeranno operative. Il Super Collisore che verrà costruito nel Texas renderà possibile l'esplorazione del «dominio della massa» fino a 2 TeV. La definizione del dominio della massa è piuttosto elastica e dipende dai particolari della reazione che produce una nuova particella. Comunque, un segno della potenza del Super Collisore è che, se nessuna particella prevista da Susy verrà trovata in questa macchina, la maggior parte dei sostenitori di Susy è d'accordo nell'abiurare la teoria con un pubblico autodafé, nel quale essi spezzeranno le loro matite di legno.

Ma l'SSC ha un obiettivo più immediato, qualcosa di più pressante che gli squark e gli sleptoni. Come riassunto compatto di tutto ciò che conosciamo, il modello standard ha due difetti principali, uno estetico e uno di sostanza. Il nostro senso estetico ci dice che ci sono troppe particelle, troppe forze. Peggio ancora, le molte particelle si distinguono fra loro per le masse casuali assegnate ai quark e ai leptoni. Anche le forze sono distinte in larga parte a causa delle masse delle particelle messaggere. Il problema di sostanza riguarda un'incoerenza nel modello. Quando le teorie dei campi di forze, che mostrano un accordo impressionante con tutti i dati, devono predire i risultati di esperimenti condotti a energie molto alte, tirano fuori delle vere e proprie assurdità fisiche. Ambedue i problemi possono essere chiariti e forse risolti aggiungendo, con la dovuta cautela, un nuovo oggetto (e una forza) al modello standard. L'oggetto e la forza vanno sotto il medesimo nome: Higgs.

Finalmente...

> Tutti gli oggetti visibili, uomini, non sono altro che maschere di cartapesta. Ma in ogni circostanza [...] qualche cosa sconosciuta ma pensante modella le sue fattezze dietro la maschera priva di ragione. Quando colpirete, uomini, colpite attraverso la maschera!
>
> Capitano Ahab

Uno dei più bei romanzi della letteratura americana è *Moby Dick* di Herman Melville. È anche uno dei più frustranti, almeno per il capitano. Per centinaia di pagine seguiamo la fissazione di Ahab di trovare e arpionare un grande mammifero marino bianco di nome Moby Dick. Ahab è fuori dalla grazia di Dio. Quella balena lo ha privato di una gamba e lui vuole vendetta. Alcuni critici letterari ipotizzano che la balena gli abbia tolto molto di più della gamba, il che sarebbe una spiegazione più soddisfacente della mania del buon capitano. Ahab spiega al suo primo ufficiale, Starbuck, che Moby Dick è più di una balena. È una maschera di cartone; è la rappresentazione di una forza abissale della natura che Ahab deve affrontare. Così, per centinaia di pagine, il capitano e la sua ciurma corrono gli oceani, fra avventure e disavventure di vario genere, ammazzando un sacco di balene più piccole di varie dimensioni. Finalmente, laggiù, soffia: la grande balena bianca. E allora, in rapida successione, la balena trascina negli abissi Ahab, uccide tutti gli altri ramponieri e affonda anche la nave, tanto per non fare favoritismi. Fine della storia. Fine del viaggio. Forse ad Ahab serviva un arpione più grande, che non era permesso dalle risorse ottocentesche. Facciamo in modo che questo non ci succeda. La particella Moby è a tiro.

Questa è la domanda anche per il nostro modello standard: è semplicemente una maschera di cartapesta? Come può una teoria essere in accordo con tutti i dati alle basse energie e predire effetti insensati alle alte energie? La risposta è quella di suggerire che la teoria sta dimenticando qualcosa, qualche nuovo fenomeno il quale, una volta messo in conto, la scosterà in maniera trascurabile dai dati alle energie prodotte al Fermilab, e dunque non modificherà il suo accordo con gli attuali dati sperimentali. Esempi di quello che è lasciato fuori potrebbero essere una nuova particella o un cambiamento nel comportamento di una forza. Questi nuovi fenomeni postulati devono alterare poco il quadro alle basse energie ma molto alle energie previste per il Super Collisore o a più alte ancora.

Questo è quello che succede pressappoco nella fisica newtoniana, che funziona molto bene per i fenomeni ordinari ma prevede che si possa accelerare un oggetto a velocità infinita; tale implausibile conseguenza è in contraddizione con la teoria della relatività speciale di Einstein. Questa ha effetti infinitesimamente piccoli alle velocità di proiettili e razzi ma, quando la velocità si approssima a quella della luce, un nuovo effetto fa capolino: le masse degli oggetti accelerati cominciano a crescere, e velocità infinite diventano impossibili. Quello che succede nella relatività speciale finisce per coincidere con i risultati newtoniani per velocità piccole in confronto alla velocità della luce. Ciò che non è appropriato in questa analogia è che, mentre il concetto di velocità infinita può essere stato fastidioso per i newtoniani, non era neppure lontanamente traumatico come lo è quello che succede alle alte energie nel modello standard. Ritorneremo presto su questo.

Ho già accennato alla funzione della particella di Higgs nel dare una massa a particelle che ne sono prive, con ciò celando la reale simmetria del mondo. È un'idea nuova e bizzarra. Fino a questo momento, come abbiamo visto nella nostra storia semplificata, la semplicità si otteneva trovando delle sottostrutture (l'idea democritea degli atomi). Così siamo passati dalle molecole agli atomi chimici, ai nuclei, ai protoni e neutroni (con i loro numerosi parenti dai nomi greci) e ai quark. Si sarebbe portati ad aspettarsi la scoperta di piccoli tipi dentro i quark, e in effetti ciò è ancora possibile. Ma noi non crediamo più veramente che questo sarà il modo in cui si arriverà alla tanto attesa teoria completa del mondo. Forse sarà più come il caleidoscopio menzionato in precedenza, in cui degli specchi spezzati convertono poche schegge di vetro colorato in una miriade di figure apparentemente complesse. Il fine ultimo di Higgs (attenzione, questa non è scienza, è filosofia) può essere quello di creare un mondo più divertente, più complesso, come suggerito nella parabola che ha aperto questo capitolo.

La nuova idea è che l'intero spazio contiene un campo, il campo di Higgs, che permea il vuoto ed è identico ovunque. Ciò significa che quando guardate le stelle in una notte chiara, voi state guardando attraverso il campo di Higgs. Le particelle, influenzate da questo campo, acquistano massa. Questo, di per sé, non è qualcosa di rimarchevole, dal momento che le particelle possono acquistare energia dai campi «gauge» che abbiamo discusso, il campo gravitazionale o il campo elettromagnetico. Per esempio, se voi portate un blocco di piombo in cima alla torre Eiffel, il blocco acquista energia potenziale a causa del cambiamento di posizione nel campo gravitazionale della Terra. Poiché $E = mc^2$, questo incremento dell'energia potenziale è equivalente a un aumento della massa, in questo caso la massa del sistema Terra-blocco di piombo. Qui dobbiamo fare una piccola aggiunta alla celeberrima equazione di Einstein. La massa m ha, in realtà, due componenti. Una è la massa a riposo, m_0, che è quella misurata in laboratorio quando la particella è, appunto, a riposo. L'altra componente viene acquisita dalla particella in virtù del suo moto (come succede ai protoni nel Tevatron) o in virtù della sua energia potenziale in un campo. Possiamo riscontrare una dinamica simile nei nuclei atomici. Per esempio, se si separano il protone e il neutrone che costituiscono il nucleo del deuterio, la somma delle masse aumenta.

Ma l'energia potenziale acquistata dal campo di Higgs differisce

per diversi aspetti dall'azione dei campi più familiari: la massa acquistata è massa a riposo. In effetti, in quella che è forse la più audace versione della teoria di Higgs, *tutta* la massa a riposo è dovuta al campo di Higgs. Un'altra differenza è che la quantità di massa dovuta al campo è diversa da particella a particella. I teorici dicono che le masse delle particelle nel nostro modello standard sono una misura di quanto intensamente siano accoppiate con il campo di Higgs.

L'influenza del campo di Higgs sulle masse dei quark e dei leptoni fa venire in mente la scoperta di Pieter Zeeman nel 1986 che i livelli energetici di un elettrone in un atomo si dividono quando un campo magnetico viene applicato all'atomo stesso. Il campo (che farebbe la parte di quello di Higgs) rompe la simmetria dello spazio di cui godeva l'elettrone. Per esempio, un livello energetico, influenzato dal magnete, si divide in tre; il livello A guadagna energia dal campo, il livello B ne perde e il livello C non cambia affatto. Naturalmente, noi adesso comprendiamo completamente ciò che succede: fa parte della teoria elettromagnetica quantistica.

Per ora non abbiamo idea delle regole che governano gli incrementi delle masse dovuti al campo di Higgs. Ma il problema ci tormenta: perché solo queste masse – quelle di W^+, W^- e Z^0, quelle dei quark «su», «giù», «incantato», «strano», «basso» e «alto», così come quelle dei leptoni – che non hanno nessuna ovvia regolarità in comune? Le masse variano da quella dell'elettrone, 0,0005 GeV, a quella del quark «alto», che deve essere maggiore di 91 GeV. Ricordiamoci che questa bizzarra idea – che porta il nome di Higgs – venne usata con grande successo per formulare la teoria elettrodebole. In quella circostanza il campo di Higgs venne proposto come un mezzo per nascondere l'unità della forza elettromagnetica e della forza debole. Quando sono unite, ci sono quattro particelle messaggere – W^+, W^-, Z^0 e il fotone – che trasportano la forza elettrodebole. Poi viene il campo di Higgs, ed ecco che le particelle W e Z succhiano il filtro di Higgs e ingrassano: il fotone rimane com'è. L'interazione elettrodebole si spezza nella debole (debole perché le sue messaggere sono così grasse) e in quella elettromagnetica, le cui proprietà sono determinate dai fotoni privi di massa. La simmetria viene così rotta spontaneamente, dicono i teorici. Io preferisco dire che il campo di Higgs nasconde la simmetria con il suo potere di dare massa. Le masse delle particelle W e Z sono state dedotte con successo dai parametri della teoria elettrodebole. E i sorrisi sollevati dei teorici ci ricordano quelli di 't Hooft e Veltman quando hanno stabilito che l'intera teoria non contiene quantità infinite.

Mi soffermo su questo punto della massa in parte perché esso mi ha accompagnato durante tutta la mia vita professionale. Negli anni Quaranta il problema sembrava ben messo a fuoco. Avevamo due particelle che esemplificavano il puzzle della massa: l'elettrone e il muone. Essi sembravano identici sotto ogni aspetto, senonché il muone pesava duecento volte più del suo cuginetto. Il fatto poi che questi erano leptoni, che non hanno a che fare con l'interazione forte, rendeva il tutto più strano. Io ero ossessionato dal problema e feci del muone il mio oggetto preferito di studio. Bisognava trovare qualche altra differenza, nel comportamento del muone e dell'elettrone, che potesse rendere conto della differenza nella massa.

L'elettrone viene occasionalmente catturato da un nucleo, dando luogo a un neutrino e a un nucleo di rinculo. Può farlo anche il muone? Misurammo il processo di cattura di un muone e – tombola! – succedeva lo stesso processo. Sappiamo che un fascio di elettroni ad alta energia diffonde protoni (questa reazione era stata studiata a Stanford). Misurammo la stessa reazione a Brookhaven con i muoni. Una piccola differenza nei tassi di diffusione ci stuzzicò per anni, ma non riuscimmo a cavarne fuori nulla. Scoprimmo anche che l'elettrone e il muone hanno differenti neutrini come partner. E avevamo anche vivisezionato il superpreciso esperimento «g meno 2», che aveva misurato il magnetismo del muone e lo aveva comparato con quello dell'elettrone. Eccetto che per l'effetto «massa extra», essi erano identici.

Tutti gli sforzi per trovare una risposta alla differenza di massa erano falliti. Lungo il cammino, Feynman aveva formulato la sua famosa domanda: «Perché il muone è pesante?». Adesso abbiamo, perlomeno, una risposta, sia pure parziale. Una voce stentorea risponde: «Higgs!». Per cinquant'anni o giù di lì abbiamo penato sul problema dell'origine della massa, ed ora il campo di Higgs presenta la questione sotto una nuova luce; non si tratta solo del muone. Esso ci fornisce, a dir poco, un'origine comune per tutte le masse. La nuova domanda in stile feynmaniano potrebbe adesso essere: in che modo il campo di Higgs determina quella sequenza di masse, apparentemente priva di regolarità, che è assegnata alle particelle di materia?

La variazione della massa con gli stati del moto, il suo cambiamento secondo la configurazione del sistema e il fatto che alcune particelle – certamente il fotone e forse i neutrini – hanno massa a riposo uguale a zero, tutto ciò mette in dubbio che il concetto di massa rappresenti un attributo *fondamentale* della materia. Dobbiamo poi ricordare il calcolo della massa che risulta in un valore infinito, cosa che non abbiamo mai risolto (semplicemente «rinormalizziamo» e via). Questa è la conoscenza di sfondo con la quale affrontiamo il problema dei quark, dei leptoni e dei vettori delle forze, che si differenziano per le masse. È questo che rende plausibile la storia che racconta Higgs, che la massa non è una proprietà intrinseca delle particelle ma una proprietà acquisita tramite la loro interazione con l'ambiente. L'idea che la massa non sia intrinseca come la carica o lo spin è resa ancora più plausibile dall'idillica nozione che quark e leptoni hanno massa zero. In questo caso, essi ubbidirebbero a un'acconcia simmetria, la simmetria chirale, nella quale i loro spin sarebbero per sempre associati con la direzione del loro moto. Ma quell'idillio è nascosto da Higgs.

Ah, dimenticavo! Abbiamo parlato dei bosoni «gauge» e dei loro spin unitari; abbiamo anche discusso dei fermioni (spin 1/2). Che razza di animale è la particella di Higgs? È un bosone con spin zero. *Spin* implica direzionalità nello spazio, ma il campo di Higgs dà massa a oggetti in qualsiasi localizzazione e senza direzionalità. Per questo la particella di Higgs è a volte chiamata «bosone scalare [senza direzione]».

La crisi dell'unitarietà

Anche se la capacità di dare massa posseduta da questo nuovo campo ci intriga assai, uno dei miei teorici preferiti, Tini Veltman, considera questo compito molto meno importante di quella che è la principale ragion d'essere del campo di Higgs, salvare la coerenza del modello standard. Senza di esso, il modello non supera un semplice test di coerenza.

Vediamo di che si tratta. Abbiamo parlato molto di collisioni. Supponiamo di scagliare un centinaio di particelle contro un bersaglio specifico, diciamo un pezzo d'acciaio di cinque centimetri quadrati di superficie. Anche un teorico di modeste capacità può calcolare la probabilità (ricordate che la teoria dei quanti ci permette solo di calcolare probabilità) che ci sarà una dispersione. Per esempio, la teoria può prevedere che verranno disperse dieci particelle delle cento che lanciamo contro il bersaglio, con una probabilità del 10%. Molte teorie prevedono che questa probabilità dipenda dall'energia del fascio che stiamo usando. Alle basse energie tutte le teorie delle interazioni che conosciamo – forte, debole ed elettromagnetica – calcolano probabilità in accordo con i dati sperimentali. È però noto che per l'interazione debole la probabilità aumenta con l'energia.

Per esempio, a livelli medi d'energia, la probabilità può aumentare fino al 40%. Se la teoria predice che la probabilità è superiore al 100%, allora chiaramente non è più buona: qualcosa non funziona, perché una probabilità superiore al 100% non ha senso. Essa significherebbe, letteralmente, che vengono disperse più particelle di quante ce ne siano nel fascio. Quando questo succede, noi diciamo che la teoria viola l'unitarietà (eccede l'unità di probabilità).

Nella nostra storia, il puzzle consisteva nel fatto che la teoria dell'interazione debole funzionasse bene alle basse energie ma diventasse un'insensatezza alle alte. La crisi venne scoperta quando le energie per le quali il disastro era calcolato erano al di là delle possibilità degli acceleratori esistenti. Ma il fallimento della teoria stava a indicare che qualcosa era stato lasciato fuori, qualche nuovo processo, forse qualche nuova particella che, se soltanto la conoscessimo, avrebbe l'effetto di evitare l'aumento della probabilità oltre il suo valore massimo. Ricorderete che l'interazione debole venne scoperta da Fermi per descrivere il decadimento radioattivo del nucleo. Questo decadimento è un fenomeno a bassa energia, e, nel suo sviluppo, la teoria di Fermi divenne molto precisa nel prevedere un ampio numero di fenomeni nel dominio delle energie fino a 100 MeV. Una delle motivazioni che si celavano dietro l'esperimento dei due neutrini era quella di controllare la teoria alle alte energie, perché le previsioni erano che una crisi dell'unitarietà sarebbe scoppiata a circa 300 GeV. Il nostro esperimento, condotto a pochi GeV, confermò che la teoria stava andando verso una crisi. Questo si rivelò essere un segnale che essa aveva lasciato fuori una particella W con massa approssimativamente di 100 GeV. La teoria originaria di Fermi, che non includeva le particelle W, era matematicamente equivalente a una che comprendesse un vettore di forza con massa infinita, e il livello di 100 GeV è così alto in comparazione con quelli dei primi esperimenti (sotto i 100 GeV) da assicurare che la vecchia teoria funzionasse bene a quei livelli. Ma quando abbiamo chiesto alla teoria che cosa avrebbero combinato i neutrini a 100 GeV, si è dovuto introdurre la particella W per evitare una crisi dell'unitarietà. Ma c'è bisogno di qualcosa di più.

Ebbene, questo riassunto è stato fatto semplicemente per spiegare come il nostro modello standard soffra di una crisi dell'unitarietà nella sua forma più virulenta. Il disastro ora arriva a un'energia di circa 1 TeV. L'oggetto che eviterebbe il disastro se... se esistesse, sarebbe una particella neutra e pesante con certe proprietà speciali che chiamiamo – indovinate un po' – particella di Higgs. (In precedenza ci siamo espressi nei termini di «campo di Higgs», ma ricordate sempre che i quanti di un campo sono insiemi di particelle.) Potrebbe trattarsi del medesimo oggetto che produce la differenza nelle masse o di un oggetto simile. Potrebbe esistere una sola particella di Higgs o una famiglia di particelle di Higgs.

La crisi della teoria di Higgs

Un sacco di domande attendono una risposta. Quali sono le proprietà delle particelle di Higgs e, cosa più importante, qual è la loro massa? Come ne potremmo riconoscere una, se la incontrassimo in una collisione? Quanti tipi ce ne sono? Generano tutte le masse o solo un incremento di esse? E come possiamo imparare di più al loro riguardo? Dato che è la Sua particella, possiamo anche aspettare, conducendo nel frattempo una vita esemplare, e sapere tutto sopra di essa quando saremo in paradiso. Oppure possiamo spendere 8 miliardi di dollari e costruirci un Super Collisore a Waxahachie, Texas, progettato per produrre la particella di Higgs.

Anche i cosmologi sono affascinati dalla teoria di Higgs, perché essi bramano per avere dei campi scalari che partecipino al complesso processo di espansione dell'universo (un altro compito che toccherebbe a Higgs). Ma su questo, di più nel capitolo IX.

Il campo di Higgs come è concepito ora può venire distrutto dalle alte energie (o alte temperature). Queste generano delle fluttuazioni quantistiche che possono neutralizzarlo. Perciò l'immagine congiunta dell'universo primitivo data dalla fisica delle particelle e dalla cosmologia, immagine pura dalle splendide simmetrie, è troppo calda per il campo di Higgs. Ma come la temperatura/energia cala sotto i 10^{15} gradi Kelvin o 100 GeV, esso spunta e fa il suo mestiere di generare masse. Così, per esempio, prima abbiamo delle particelle W e Z e dei fotoni senza massa e un'interazione elettrodebole unificata. L'universo si espande e si raffredda ed ecco la particella di Higgs, che ingrassa le W e le Z mentre, per qualche ragione, ignora i fotoni, e ciò produce la rottura della simmetria elettrodebole. Otteniamo un'interazione debole, mediata da vettori di forza dotati di massa, W^+, W^- e Z^0, e una forza elettromagnetica distinta, i cui vettori sono i fotoni. È come se per alcune particelle il campo di Higgs fosse fatto di olio denso, attraverso il quale esse si muovono pigramente, tanto da sembrare pesanti. Per altre particelle, invece, il campo di Higgs è come acqua, e per altre ancora, come i fotoni e forse i neutrini, è invisibile.

A questo punto dovrei forse fare la storia dell'idea di Higgs, dato che sono stato un po' precipitoso nel mettere il carro davanti ai buoi. Viene anche chiamata «simmetria nascosta» o «rottura spontanea della simmetria» e fu introdotta nella fisica delle particelle da Peter Higgs dell'Università di Edimburgo. È stata usata indipendentemente da teorici come Steven Weinberg e Abdus Salam per comprendere la conversione di un'interazione elettrodebole unificata e simmetrica, trasmessa da una felice famigliola di quattro particelle prive di massa, in due forze molto diverse: l'elettrodinamica quantistica con i suoi fotoni senza massa e l'interazione debole con le W^+, W^- e Z^0 dotate di massa. Weinberg e Salam lavorarono sulle basi fornite da un precedente lavoro di Sheldon Glashow, il quale, seguendo a sua volta Julian Schwinger, era arrivato a capire che c'era una teoria coerente dell'interazione elettrodebole unificata, ma non aveva messo insieme tutti i dettagli. E c'erano Jeffrey Goldstone e Martinus Veltman e Gerard 't Hooft. E molti altri che dovrebbero essere menzionati, ma così è la vita. E poi, quanti teorici ci sono voluti per poter accendere una lampadina?

Un altro modo di guardare al campo di Higgs è dal punto di vista della simmetria. Alle alte temperature c'è simmetria: pura, ammirabile semplicità. A temperature più basse la simmetria si spezza. Ancora qualche metafora.

Considerate un magnete. Un magnete è tale perché, a bassa temperatura, i suoi magneti atomici sono allineati. Un magnete ha una direzione speciale, il suo asse nord-sud. Esso ha perso la simmetria di un pezzo di metallo non magnetico, nel quale tutte le direzioni spaziali sono equivalenti. Noi possiamo smagnetizzarlo. Alzando la temperatura, otteniamo un pezzo di ferro smagnetizzato da uno magnetizzato. Il calore agita le molecole, il che alla fine distrugge l'allineamento, e abbiamo una più pura simmetria. Un'altra popolare metafora è quella del sombrero messicano: una cupola simmetrica circondata da una tesa simmetrica. Mettiamo una pallina di vetro sulla punta della cupola. Simmetria rotazionale perfetta, ma instabile. Quando la pallina cade in una posizione più stabile (con un'energia più bassa) da qualche parte sulla tesa, la simmetria è distrutta, anche se la struttura di base è simmetrica.

In un'altra metafora immaginiamo una sfera perfetta piena di vapore acqueo a temperatura molto alta. La simmetria è assoluta. Se raffreddiamo il sistema, otterremo alla fine una sfera piena d'acqua con qualche pezzetto di ghiaccio galleggiante e del vapore acqueo residuo in superficie. La simmetria è stata completamente spezzata

semplicemente abbassando la temperatura, azione che in questa metafora permette al campo gravitazionale di esercitare la sua influenza. A ogni modo, il paradiso può essere recuperato semplicemente riscaldando il tutto.

Alla fine della fiera: prima di Higgs, simmetria e noia; dopo Higgs, complessità e animazione. La prossima volta che guarderete il cielo stellato siate consapevoli che tutto lo spazio è pervaso di questa misteriosa influenza del campo di Higgs che è responsabile, così dice la teoria, della complessità del mondo che conosciamo e amiamo.

Adesso immaginatevi le formule (argh!) che permettono di calcolare le proprietà delle particelle e delle forze che misuriamo al Fermilab e nei nostri acceleratori degli anni Novanta. Quando inseriamo reazioni da condurre a più alte energie, le formule producono delle insensatezze. Ah, ma se includiamo il campo di Higgs, allora modifichiamo la teoria e ne otteniamo una versione coerente anche a energie di 1 TeV. In questo modo si salva la baracca, il modello standard con tutte le sue virtù. Questo prova che la teoria di Higgs è corretta? Niente affatto. È solamente il meglio che riescono a fare i fisici teorici. Forse Lei, l'Onnipotente, è ancora più brillante.

Una digressione sul nulla

Ai tempi di Maxwell, i fisici pensavano di aver bisogno di un mezzo che pervadesse tutto lo spazio e attraverso il quale potessero viaggiare la luce e le altre onde elettromagnetiche. Lo chiamarono etere e gli attribuirono le proprietà adeguate affinché svolgesse il lavoro assegnatogli. L'etere forniva anche un sistema di coordinate privilegiato per misurare la velocità della luce. Il colpo di genio di Einstein mostrò come esso fosse un accessorio non necessario per lo spazio. E qui si ha a che fare con un venerabile concetto, nientepopodimeno che il «vuoto» inventato (o scoperto) da Democrito. Oggigiorno il vuoto, o più precisamente lo «stato di vuoto», è alla ribalta.

Lo stato di vuoto consiste di quelle regioni dell'universo dalle quali tutta la materia è stata rimossa e dove non esistono né energia né momento. È il «nulla assoluto». James Bjorken, parlando di esso, ha detto di essere stato tentato di tenere una conferenza sulla fisica delle particelle nello stile di un'opera musicale di John Cage: quattro minuti e ventidue secondi di... silenzio. Solo il timore del presidente della conferenza lo aveva trattenuto. Bjorken, esperto delle proprietà dello stato di vuoto, non è comparabile con 't Hooft, il quale capisce il nulla molto meglio.

La parte dolente della storia è che la pristina assolutezza dello stato di vuoto (dal punto di vista concettuale) è stata così inquinata dai teorici del XX secolo (aspettate che lo sappia il WWF) che è molto più complicata dell'etere del XIX secolo. Ciò che sostituisce l'etere, oltre ai fantasmi di tutte le particelle virtuali, è il campo di Higgs, le cui vere dimensioni non conosciamo ancora. Per fare il suo lavoro, deve esistere, e deve essere sperimentalmente rilevabile, almeno una particella di Higgs elettricamente neutra. Questa può essere solo la punta dell'iceberg: un intero zoo di bosoni di Higgs può rivelarsi necessario per descrivere completamente il nuovo etere. Chiaramente ci sono nuove forze e nuovi processi. Possiamo così riassumere il poco che sappiamo: almeno alcune delle particelle che rappresentano l'etere higgsiano devono avere spin zero, essere intimamente e misteriosamente connesse con la massa, e manifestarsi a temperature equivalenti a un'energia minore di 1 TeV. Anche la struttura della particella di Higgs è controversa. Una scuola di pensiero la ritiene una particella fondamentale. Un'altra sostiene che è composta di nuovi oggetti, del tipo dei quark, che potrebbero essere visti in laboratorio, prima o poi. Una terza scuola è affascinata dall'imponente massa del quark «alto» e crede che la particella di Higgs sia uno stato legato di questo quark e del rispettivo antiquark: solo i dati chiariranno ciò. Nel frattempo, è praticamente un miracolo che noi riusciamo a vedere le stelle.

Il nuovo etere è allora un quadro di riferimento per l'energia, in questo caso energia potenziale. E la particella di Higgs da sola non spiega gli altri detriti e tutta la spazzatura teorica che riempie il vuoto. Le teorie di gauge vi scaricano le loro condizioni, i cosmologi sfruttano la «falsa» energia del vuoto e, durante l'evoluzione dell'universo, il vuoto può pure restringersi ed espandersi.

C'è da augurarsi un nuovo Einstein che, con un colpo di genio, ci ridia il nostro amato nulla.

Trovate la particella di Higgs!

La teoria di Higgs è grandiosa. Perché, allora, non è universalmente accettata? Peter Higgs, che le ha prestato il suo nome (di malavoglia), lavora su altre cose. Veltman, uno degli architetti della teoria, la chiama il tappeto sotto il quale ramazziamo via la nostra ignoranza. Glashow è anche meno gentile, quando la chiama un WC dove gettiamo le incoerenze delle nostre attuali teorie. E l'obiezione principale è che non esiste uno straccio di evidenza sperimentale.

Come si prova l'esistenza del campo di Higgs? Esso, proprio come l'elettrodinamica e la cromodinamica quantistiche o l'interazione debole, ha la sua particella vettore, il bosone di Higgs. Volete provare che il campo di Higgs esiste? Trovate la particella. Il modello standard ci dice che la più piccola massa possibile (ce ne sono diverse) per la particella di Higgs deve «pesare» meno di 1 TeV. Perché? Perché se è maggiore di 1 TeV il modello standard diventa incoerente e incappiamo nella crisi dell'unitarietà.

Il campo di Higgs, il modello standard e la nostra idea di come Dio ha fatto l'universo dipendono dal ritrovamento del bosone di Higgs. Sfortunatamente, non c'è sulla Terra un acceleratore che abbia energia sufficiente per creare una particella «pesante» 1 TeV.

Però possiamo costruirlo.

Il desertrone

Nel 1981 eravamo, noi del Fermilab, impegnati a costruire il Tevatron e la macchina per collisioni pi/pi meno. Naturalmente, stavamo anche attenti a quello che succedeva nel mondo e in particolare al CERN, dove stavano cercando W. Per la tarda primavera di quell'anno cominciavamo a essere fiduciosi circa la possibilità che magneti superconduttori funzionassero e potessero essere prodotti su scala industriale con i requisiti richiesti. Eravamo convinti, o almeno lo eravamo al 90%, che il livello di 1 TeV, la terra promessa della fisica delle particelle, potesse essere raggiunto a costi relativamente modesti.

Perciò diventava sensato cominciare a pensare alla «macchina della nuova generazione» (dopo il Tevatron) come a un anello ancora più grande di magneti superconduttori. Ma nel 1981 il futuro della ricerca sulle particelle negli Stati Uniti era ipotecato da una macchina in lotta per la sopravvivenza al laboratorio di Brookhaven. Si trattava del progetto Isabella, una macchina per collisioni protone-protone di modesta energia che avrebbe dovuto essere operativa nel 1980, ma la cui entrata in funzione era stata ritardata da problemi tecnici. Nel frattempo le frontiere della fisica si erano spostate.

Al raduno annuale degli utenti del Fermilab nel maggio 1981, dopo avere coscienziosamente riferito sullo «stato del laboratorio», mi avventurai a parlare del futuro del settore, e specialmente della «nuova frontiera dell'energia a 1 TeV». Feci notare come Carlo Rubbia, allora già una personalità dominante al CERN, avrebbe presto «pavimentato il tunnel del LEP con magneti superconduttori». L'anello del LEP, circa ventisette chilometri di circonferenza, contene-

va dei magneti convenzionali per la sua macchina $e^+ e^-$. Il LEP necessitava di quel grande raggio per ridurre l'energia persa dagli elettroni. Questi irradiano energia quando costretti dai magneti in un'orbita circolare. (Minore il raggio, ricordate, maggiore la radiazione.) Per questo la macchina LEP del CERN aveva campi deboli e un grande raggio. Questo la rendeva anche particolarmente adatta ad accelerare protoni, perché essi, a causa della loro massa maggiore, non irradiano molta energia. I lungimiranti progettisti del LEP avevano sicuramente questo in mente come eventuale futuro uso del tunnel. Una macchina del genere, dotata di magneti superconduttori, avrebbe potuto facilmente operare a 5 TeV per anello, ovvero 10 TeV per collisione. E tutto quello che gli Stati Uniti avevano da opporre, oltre al Tevatron da 2 TeV, era l'infelice Isabella, una macchina da 400 GeV (0,8 TeV in totale), anche se aveva un tasso di collisioni molto alto.

Nell'estate del 1982, sembrava che sia il programma del magnete superconduttore del Fermilab sia quello della macchina protone-antiprotone del CERN fossero avviati al successo. Quando i fisici americani delle alte energie si riunirono a Snowmass, in Colorado, in agosto, per discutere le prospettive del ramo, feci la mia mossa. In un discorso intitolato «La macchina nel deserto» proposi che la comunità prendesse in seria considerazione l'eventualità di porre come suo obiettivo prioritario la costruzione di un grande nuovo acceleratore basato sulle «collaudate» tecnologie dei supermagneti e di spalancare le porte al dominio della massa a 1 TeV. Ricordiamo che per produrre particelle che possano avere una massa di 1 TeV, i quark che partecipano alla collisione devono contribuire almeno con questo livello d'energia. I protoni, che portano i quark e i gluoni, devono avere molta più energia. La mia congettura nel 1982 ipotizzava 10 TeV in ogni fascio. Feci un'audacissima stima ipotetica dei costi e fondai il mio argomento solidamente sulla premessa che la sfida era troppo affascinante per non raccoglierla.

A Snowmass ci fu un dibattito moderatamente vivace sul desertrone, come venne subito chiamato. Il nome era dovuto all'idea che una macchina così grande potesse essere costruita solo in una località disabitata, senza terreni di valore e priva di rilievi e avvallamenti. Quello che era sbagliato dell'idea era che io, newyorchese topo di città, cresciuto praticamente nella metropolitana, avevo completamente sottovalutato le capacità dell'ingegneria sotterranea. La macchina tedesca HERA passa sotto Amburgo, che pure è una città densamente popolata. Il tunnel del LEP al CERN, sotto i monti del Giura.

Cercai di forgiare un'alleanza di tutti i laboratori americani per appoggiare l'idea. Lo SLAC stava sempre pensando ad accelerare elettroni; Brookhaven stava lottando per tenere in vita Isabella; e una vivace e talentuosa banda a Cornell stava cercando di elevare la sua macchina a elettroni a un rango che prese il nome di CESR II. Io battezzai il mio desertrone «Slermihaven II» per enfatizzare l'unione di tutti questi accanitamente competitivi laboratori a pro di questa nuova avventura.

Non voglio addentrarmi nei meandri della politica della ricerca, e per farla breve dirò che dopo un anno d'intenso lavoro la comunità dei fisici delle particelle americani fece la formale raccomandazione di abbandonare Isabella in favore del desertrone. Adesso chiamato Super Collisore Superconduttore, avrebbe dovuto essere capace di 20 TeV in ciascun fascio. Al tempo stesso – luglio 1983 – il nuovo acceleratore del Fermilab si conquistò l'onore delle prime pagine accelerando protoni all'energia record di 512 GeV. Questo successo fu presto seguito da altri, e circa un anno dopo il Tevatron arrivava a 900 GeV.

Il presidente Reagan e il Super Collisore: una storia vera

Nel 1986 il progetto dell'SSC era pronto per essere sottoposto al presidente Reagan per l'approvazione. Come direttore del Fermilab, mi fu chiesto da un sottosegretario del Dipartimento per l'energia se potevo preparare un breve video per il presidente. Egli pensava che una lezioncina di dieci minuti sulla fisica delle alte energie sarebbe stata utile per quando il progetto fosse arrivato al momento della discussione in una riunione di Gabinetto. Ma come si fa a insegnare a un presidente la fisica delle alte energie in dieci minuti? E, cosa più importante, come farlo con *questo* presidente? Dopo esserci strizzati ben bene il cervello, ci venne l'idea di girare il video durante una visita al laboratorio di qualche ragazzino delle scuole superiori, che avrebbe fatto un giro del macchinario, posto un sacco di domande e ricevuto delle risposte su misura per lui. Il presidente lo avrebbe visto e forse avrebbe potuto farsi un'idea di quello che è la fisica delle alte energie. Così invitammo dei ragazzini di una scuola vicina. Preparammo un pochino la cosa, ma lasciammo che riuscisse il più possibile spontanea. Filmammo circa trenta minuti e ne montammo i migliori quattordici. Il nostro contatto a Washington ci mise in guardia: non più di dieci minuti, disse, e qualcos'altro a proposito della soglia d'attenzione. Allora tagliammo ancora e gli mandammo dieci lucidi minuti di fisica delle alte energie per ragazzini del primo anno

delle superiori. Dopo qualche giorno ricevemmo la risposta: «Troppo complicato! Non ci siamo proprio».

Che fare? Rifacemmo il sonoro, eliminando le domande dei ragazzini. Alcune di esse erano piuttosto acute, dopotutto. Le sostituimmo con una voce fuori campo che riassumeva il tipo di domande che avrebbero potuto fare i ragazzini (questa volta scritte da me) e dava le risposte, mentre le immagini restavano le stesse: gli scienziati che fungevano da guide additando e i ragazzi che seguivano con sguardo beato. Questa volta l'avevamo fatto semplicissimo e chiarissimo. Lo provammo con gente scientificamente illetterata e infine lo spedimmo. Il nostro tipo del Dipartimento per l'energia stava diventando impaziente.

Ma ancora non c'eravamo: «È già meglio, ma è ancora troppo complicato».

Cominciai a innervosirmi un po'. Non soltanto l'SSC era in pericolo, ma anche il mio posto era in gioco. Quella notte mi alzai alle tre con una brillante idea in testa. Il nuovo video sarebbe stato così: una Mercedes arriva all'ingresso del laboratorio, e ne scende un distinto signore sulla cinquantina. La voce fuori campo dice: «Ecco il giudice Sylvester Matthews del quattordicesimo tribunale federale distrettuale che si appresta a visitare un grande laboratorio di ricerca governativo». Il giudice spiega ai suoi ospiti, tre scienziati giovani e belli (tra loro una donna), che ha traslocato di recente nelle vicinanze e che tutte le mattine passa davanti al laboratorio per andare al tribunale. Ha letto qualcosa sul nostro lavoro sul «Chicago Tribune», sa che traffichiamo con «volt» e «atomi» e, dal momento che non ha mai studiato fisica, è curioso di sapere che cosa sta succedendo. Entra nell'edificio, ringraziando i tre scienziati per aver accettato di trascorrere un po' del loro tempo con lui questa mattina.

La mia idea era che il presidente si sarebbe identificato con un intelligente profano che è sufficientemente sicuro di se stesso per ammettere che non ne capisce niente. Nei successivi otto minuti e mezzo, il magistrato interrompe frequentemente i fisici per chiedere loro di andare più piano e chiarirgli meglio questo o quel punto. Dopo nove minuti e qualcosa, il giudice tira su il polsino, guarda il suo Rolex e ringrazia gentilmente gli scienziati. Poi, con un timido sorriso, dice: «Sapete, a dire il vero non ho capito la maggior parte di ciò che mi avete detto, ma ho percepito, quello sì, il vostro entusiasmo e la grandezza della vostra ricerca. Mi ha fatto venire in mente quello che deve essere stata la conquista del West... un uomo solo sul suo cavallo in una vasta terra inesplorata...» (ebbene sì, ho scritto questa roba).

Quando il video arrivò a Washington, il sottosegretario ne fu estasiato. «Ci siamo! È fantastico. Proprio quello che ci voleva! Lo proietteremo a Camp David nel weekend.»

Molto sollevato, me ne andai a letto sorridente, ma mi svegliai alle quattro del mattino in un bagno di sudore freddo. Qualcosa non andava. Capii che cosa. Non avevo detto al sottosegretario che il giudice era un attore, ingaggiato al Chicago Actors' Bureau. In quel momento il presidente stava incontrando dei problemi nel farsi approvare un candidato alla Corte Suprema. E se lui... Mi agitai e sudai fino a quando furono le otto del mattino a Washington. Al terzo tentativo trovai il sottosegretario.

«A proposito di quel video...»

«Le ho già detto che era grande.»

«Ma devo dirle che...»

«È buono, non si preoccupi. È già stato mandato a Camp David.»

«Aspetti» mi misi a gridare. «Mi ascolti! Il giudice. Non è un vero giudice. È un attore, e il presidente potrebbe voler parlare con lui, avere un colloquio. Sembra così intelligente. Supponga che lui...» (Seguì una lunga pausa.)

«La Corte Suprema?»

«Appunto.»

(Pausa, e poi una risatina cinica.) «Guardi, se dico al presidente che è un attore, di sicuro lo nomina alla Corte Suprema.»

Dopo poco il presidente approvò il progetto SSC. Secondo quanto scrisse l'opinionista George Will, la discussione era stata breve. Durante una riunione di Gabinetto il presidente aveva ascoltato il parere dei ministri, che erano equamente divisi sui meriti del progetto. Poi citò un famoso *quarterback*:* «Lancia profondo». Dal che tutti i membri del governo supposero che volesse dire «Facciamolo». Così il Super Collisore entrò a far parte della politica nazionale.

Nell'anno successivo si accese una vivace gara per scegliere il sito dell'SSC, nella nazione e anche in Canada. Qualcosa del progetto sembrava eccitare particolarmente la gente. Figuratevi una macchina che poteva spingere il sindaco di Waxahachie, Texas, ad arringare il pubblico con un acceso discorso, che terminava così: «E questa nazione deve essere la prima a trovare il bosone scalare di Higgs!». L'SSC fece la sua comparsa perfino in «Dallas», in una puntata in cui J.R. Ewing e altri tentavano di acquistare dei terreni attorno al sito in cui sorge.

* Si tratta del «regista» di una squadra di football americano, il giocatore che ha il compito di dettare l'azione e lanciare la palla agli avanti. (*NdT*)

Quando riferii le parole del sindaco in una riunione della Conferenza nazionale dei governatori, in uno dei milioni di discorsi che feci per vendere l'SSC, venni interrotto dal governatore del Texas, che voleva correggere la mia pronuncia di Waxahachie. A quanto sembrava, avevo deviato più della normale differenza ammessa fra il texano e il newyorchese. Non ce la feci a resistere. «Signore, ho fatto del mio meglio» assicurai il governatore. «Sono andato là, mi sono fermato in un ristorante, e ho chiesto alla cameriera di dirmi dove mi trovavo, in modo chiaro e distinto. "B-U-R-G-E-R-K-I-N-G" ha pronunciato.» La maggioranza dei governatori risero, ma non quello del Texas.

Il 1987 fu l'anno di tre superstar. La prima fu la supernova che era esplosa 160.000 anni fa nella Grande Nube di Magellano: finalmente il suo segnale era arrivato al nostro pianeta, così che per la prima volta si ricevevano neutrini provenienti dall'esterno del nostro sistema solare. Poi ci fu la scoperta della superconduttività ad alta temperatura, che eccitò il mondo con le prospettive dei suoi benefici tecnologici. Si sollevarono speranze che presto avremmo avuto superconduttori a temperature ambientali. Si spalancarono visioni di riduzioni dei costi energetici, treni a levitazione, miriadi di miracoli tecnologici e, per la scienza, costi molto ridotti per l'SSC. Adesso è chiaro che eravamo troppo ottimisti. Nel 1993 i superconduttori ad alte temperature costituiscono ancora una frontiera della ricerca per comprendere la natura del materiale, e le applicazioni commerciali e pratiche non sono ancora in vista.

La terza superstar fu la ricerca del sito dell'SSC. Il Fermilab era uno dei competitori, soprattutto a causa del fatto che il Tevatron avrebbe potuto essere usato come iniettore per l'anello principale dell'SSC, un percorso ovale con una circonferenza di ottantacinque chilometri. Ma dopo aver soppesato tutti i pro e i contro, l'apposito comitato del Dipartimento per l'energia scelse Waxahachie. La decisione fu annunciata nell'ottobre 1988, poche settimane dopo che avevo dilettato un grande raduno del personale del Fermilab con le mie barzellette da premio Nobel. Adesso l'abbacchiato personale si riunì per ascoltare la notizia e discutere del futuro del laboratorio.

Nel 1993, il Super Collisore Superconduttore è in costruzione, con il 2000 come probabile data di completamento dei lavori, anno più, anno meno.* Il Fermilab sta lavorando duramente per aumentare il numero di collisioni pi/pi meno, migliorare le sue chances di trovare il quark «alto» ed esplorare i livelli più bassi della grande montagna che il collisore deve scalare.

* Motivi di ordine finanziario hanno indotto il Congresso degli Stati Uniti a cancellare il progetto dell'SSC già pochi mesi dopo la sua approvazione. (*NdT*)

Naturalmente, l'Europa non sta a guardare. Dopo un periodo di vigorosi dibattiti, studi, progetti e riunioni di comitati, Carlo Rubbia, direttore generale del CERN, ha deciso di «pavimentare il tunnel del LEP con magneti superconduttori». Ricorderete che l'energia di un acceleratore è determinata dal diametro del suo anello e dalla forza dei suoi magneti. Vincolati ai ventisette chilometri di circonferenza del tunnel, i progettisti del CERN furono obbligati a ricercare il campo magnetico più potente tecnologicamente ipotizzabile. Questo era di 10 tesla, circa il 60% più intenso dei magneti dell'SSC e due volte e mezzo di quello del Tevatron. Per vincere questa formidabile sfida occorrerà arrivare a un nuovo livello di sofisticazione nella tecnologia dei superconduttori. Se ci si arriverà, la macchina europea avrà un'energia di 17 TeV, contro i 40 TeV dell'SSC.

Se ambedue queste nuove macchine saranno realizzate, l'investimento complessivo, in termini di risorse sia finanziarie sia umane, sarà enorme. E che cosa succederebbe se l'idea di Higgs si rivelasse sbagliata? Anche se lo fosse, l'utilità di guardare nel «dominio della massa a 1 TeV» resterebbe uguale; il nostro modello standard deve essere o modificato o rigettato. È come quando Colombo partì per le Indie. Se anche non ci fosse arrivato, pensava il sincero credente, avrebbe trovato qualcos'altro, forse ancor più interessante.

IX
Spazio interno, spazio esterno e il tempo prima del tempo

> Se per Piccadilly vai qua e là / con un papavero o un lillà / nella tua mano medievale... / Allora ognuno dir potrà / della tua mistica beltà: / qualcosa esprime il giovane / per me troppo profondo. / Oh, che profondo giovane / questo giovane profondo!
>
> GILBERT AND SULLIVAN, *Patience*

Nella sua *Difesa della poesia*, il poeta romantico inglese Percy Bysshe Shelley sosteneva che uno dei sacri compiti dell'artista è quello di «assorbire le nuove conoscenze scientifiche e assimilarle con i bisogni umani, colorarle con le passioni umane e trasformarle nella carne e nel sangue dell'umana natura».

Non ci furono molti poeti romantici che raccolsero l'invito di Shelley, il che può spiegare il deplorevole stato presente della nostra nazione e del pianeta. Se i Byron, i Keats, gli Shelley e i loro equivalenti francesi, italiani e urdu avessero spiegato la scienza, il pubblico sarebbe certamente molto meno analfabeta dal punto di vista scientifico di quanto lo è ora. Escluso, naturalmente, chi legge (non più «caro lettore», ma amico e collega, che ha faticato con me per arrivare fino al capitolo IX, e che d'ora in poi, per regio decreto, è un lettore altamente qualificato e scientificamente letterato).

Quelli che misurano quanto illetterati siamo dal punto di vista scientifico, ci assicurano che solo una persona su tre è in grado di definire che cosa sia una molecola o di nominare uno scienziato vivente. Io ero solito abbellire queste deludenti statistiche aggiungendo: «E sapete che solo il 60% degli abitanti di Liverpool capisce la teoria di gauge non abeliana?». Di ventitré laureati di Harvard, scelti a caso alla cerimonia di conferimento dei diplomi del 1987, solamente due erano in grado di spiegare perché fa più caldo d'estate che d'inverno. La risposta, in ogni caso, non è «perché il Sole è più vicino in estate». Non è più vicino. L'asse di rotazione della Terra è inclinato, così che quando l'emisfero nord è inclinato verso il Sole, i raggi sono più prossimi a essere perpendicolari alla superficie, e metà del globo si gode l'estate. L'altro emisfero riceve i raggi obliquamente: là è inverno. Sei mesi dopo la situazione è rovesciata.

Ma la cosa peggiore riguardante l'ignoranza di quei ventuno (su ventitré) laureati di Harvard – Harvard, mio Dio! – che non sapevano rispondere è quello che hanno perduto. Avranno vissuto senza comprendere una fondamentale esperienza umana: l'alternarsi delle stagioni. Naturalmente, ci sono sempre quei momenti che fanno ritornare la fiducia nel genere umano. Diversi anni fa, nella metropolitana di Manhattan, c'era un vecchio che tentava di risolvere un elementare problema di calcolo nel suo manuale di matematica e, preso dalla disperazione, si rivolse a uno straniero seduto vicino a lui, chiedendogli se sapesse qualcosa di matematica. Lo straniero fece cenno di sì e risolse il problema. Certo, non capita tutti i giorni di incontrare una persona anziana che studi matematica, seduta in metropolitana accanto al premio Nobel T.D. Lee.

A me capitò un'esperienza ferroviaria simile, ma con una fine diversa. Ero seduto in un affollato treno di pendolari in partenza da Chicago, quando salì un'infermiera con un gruppo di pazienti della locale clinica per malattie mentali. Si raggrupparono attorno a me e l'infermiera cominciò a contarli: «Uno, due, tre...». Arrivò a me, mi guardò e disse: «Voi chi siete?».

«Sono Leon Lederman» risposi, «vincitore del premio Nobel e direttore del Fermilab.»

«Oh sì», mi puntò il dito e mi mise nel conto. «Quattro, cinque, sei...»

Parlando adesso seriamente, la preoccupazione relativa all'analfabetismo scientifico è legittima, fra le altre ragioni, a causa dei sempre più stretti legami fra scienza, tecnologia e benessere pubblico. E poi c'è il fatto che è un gran peccato non saper nulla della visione del mondo che ho cercato di presentare in queste pagine. Sebbene ancora incompleta, essa è maestosa, è bella, ha un'incipiente semplicità. Come disse Jacob Bronowski:

> Il progresso scientifico consiste nella scoperta, a ogni passo, di un nuovo ordine che dà unità a quello che prima sembrava distinto. Faraday fece questo quando strinse il legame fra elettricità e magnetismo. Clerk Maxwell lo fece quando unì entrambi alla luce. Einstein collegò tempo e spazio, massa ed energia, e il percorso di un raggio di luce che balena vicino al sole con il volo di un proiettile; e spese i suoi ultimi giorni cercando di aggiungere a questa unificazione un'altra ancora, che avrebbe dato un unico e grandioso ordine alle equazioni di Maxwell e alla sua geometria della gravitazione.
>
> Quando Coleridge cercava di definire la bellezza, ritornava sempre a un'unica, profonda idea: la bellezza, egli diceva, è «unità nella varietà». La scienza non è altro che la ricerca per scoprire l'unità nella selvaggia varietà della natura o, più esattamente, nella varietà della nostra esperienza.

Spazio interno/spazio esterno

Per vedere l'edificio nel suo proprio contesto, faremo un'escursione nel campo dell'astrofisica, e io spiegherò perché la fisica delle particelle e l'astrofisica siano oggi così strettamente connesse, in quella che ho chiamato la connessione spazio interno/spazio esterno.

Mentre i ragazzi dello spazio interno stavano costruendo acceleratori-microscopi sempre più potenti per vedere nel dominio subnucleare, i nostri colleghi dello spazio esterno stavano elaborando dati provenienti da telescopi di sempre maggiore potenza, dotati di nuove tecnologie che ne aumentavano la sensibilità e la capacità di vedere in dettaglio. Un altro grande salto di qualità venne con gli osservatori spaziali con a bordo strumenti capaci di rilevare infrarossi, ultravioletti, raggi X, raggi gamma... in breve, l'intero spettro elettromagnetico, di gran parte del quale era stata fino a ora impedita la ricezione dall'atmosfera terrestre.

La sintesi degli ultimi cento anni in cosmologia è rappresentata dal «modello standard cosmologico». Secondo questo modello, l'universo ebbe inizio 15 miliardi di anni fa come uno stato caldo, denso e compatto. Allora esso era infinitamente, o quasi infinitamente, denso e infinitamente, o quasi infinitamente, caldo. La parola «infinito» non piace ai fisici; il suo uso è dovuto all'influenza non ancora ben compresa della teoria dei quanti. Per ragioni che forse non conosceremo mai, l'universo esplose e da allora è andato sempre espandendosi e raffreddandosi.

Come sono arrivati i cosmologi a questa sintesi? Il modello del Big Bang ebbe origine negli anni Trenta, dopo la scoperta che le galassie, agglomerati di 100 miliardi di stelle o giù di lì, stavano tutte allontanandosi le une dalle altre e dal signor Edwin Hubble, al quale capitò di misurare le loro velocità nel 1929. Hubble doveva raccogliere sulla luce proveniente dalle galassie lontane dati sufficienti per risolvere la questione delle righe spettrali e confrontarle con le righe degli stessi elementi sulla Terra. Egli notò che tutte le righe si spostavano sistematicamente verso il rosso. Si sapeva che una fonte di luce che si sta allontanando dall'osservatore si comporta proprio in questo modo. Lo «spostamento verso il rosso» (*red shift*) era in effetti una misura della velocità relativa della fonte e dell'osservatore. Con il passare degli anni, Hubble scoprì che tutte le galassie si stavano allontanando da lui in tutte le direzioni: si lavava tutti i giorni, e non c'era niente di personale in questo comportamento delle galassie; era semplicemente una manifestazione dell'espansione dello

spazio. Poiché l'espansione dello spazio sta aumentando le distanze fra tutte le galassie, l'astronoma Hedwina Knubble osserverebbe lo stesso fenomeno dal pianeta Twilo del sistema di Andromeda: galassie che scappano via da lei. E più distante è l'oggetto, più veloce si muove. Questo è il succo della legge di Hubble. Essa implica che, se facciamo scorrere il film all'indietro, le galassie più lontane, muovendosi più velocemente, si approssimeranno a quelle più vicine, e alla fine l'intero universo si ridurrà rapidamente a un volume piccolissimo in corrispondenza a un tempo che oggi stimiamo essere circa 15 miliardi di anni fa.

La più celebre metafora scientifica vi chiede di immaginarvi come una creatura bidimensionale, un abitante di Piattolandia. Per voi esistono est-ovest e nord-sud, ma *non* su e giù. La relazione su-giù diventa inconcepibile. Voi vivete sulla superficie di un pallone che si sta espandendo. Distribuite sulla superficie ci sono le residenze degli osservatori: pianeti e stelle, raggruppati in galassie. Tutto bidimensionale. Da ogni punto di vista, tutti gli oggetti si allontanano l'uno dall'altro con l'espandersi della superficie. La distanza fra due punti qualsiasi in questo universo aumenta. Così succede anche nel nostro mondo tridimensionale. L'altra virtù di questa metafora è che, come nel nostro vero universo, non c'è un luogo privilegiato. Tutti i punti sulla superficie sono democraticamente uguali a tutti gli altri. Nessun centro. Nessun bordo. Nessun pericolo di cadere fuori dall'universo. Dal momento che la metafora del nostro universo in espansione (la superficie del pallone) è tutto quello che conosciamo, le stelle non si stanno muovendo *nello* spazio. È lo spazio stesso ciò che si sta espandendo, trascinandosi appresso tutta la baracca. Non è facile visualizzare una dilatazione che sta avvenendo uniformemente nell'universo. Non c'è fuori, non c'è dentro. C'è solo questo universo, in espansione. Dentro che cosa si sta espandendo? Pensate ancora di essere un abitante di Piattolandia sulla superficie del pallone. La superficie è tutto ciò che esiste nella nostra metafora.

Due notevoli conseguenze empiriche della teoria del Big Bang vinsero alla fine l'opposizione, tanto che esiste oggi un ampio consenso attorno a essa. Una è la predizione che la luce dell'originaria incandescenza – assumendo che fosse molto, molto calda – dovrebbe essere ancora in giro sotto forma di radiazione residua. Ricordate che la luce consiste di fotoni, e che l'energia dei fotoni si pone in relazione inversa con la loro lunghezza d'onda. Una conseguenza dell'espansione dell'universo è che tutte le lunghezze si accrescono. Si

poteva dunque prevedere che le lunghezze d'onda, inizialmente infinitesimali, come confà a fotoni altamente energetici, sarebbero cresciute fino a raggiungere la regione delle microonde di pochi millimetri. Nel 1965 la brace del Big Bang, la radiazione di microonda, venne scoperta. Dei fotoni che avevano iniziato il loro viaggio miliardi di anni fa, quando l'universo era molto più piccolo e caldo, lo finivano proprio su un'antenna dei Bell Labs nel New Jersey. Quando si dice il destino!

Dopo questa scoperta divenne cruciale misurare la distribuzione delle lunghezze d'onda (rileggete per favore il capitolo V), il che venne infine fatto. Usando l'equazione di Planck, la misurazione vi dà la temperatura media di tutto il lotto (spazio, stelle, polvere di stelle, un satellite artificiale vagabondo) dentro questo bagno di fotoni. Secondo le ultime misurazioni della NASA (1991) rilevate con il satellite COBE, questa temperatura media è 2,73 gradi sopra lo zero assoluto (2,73 gradi Kelvin). Anche questa radiazione residua costituisce un forte supporto empirico per la teoria del Big Bang.

Quando si fa la lista dei successi, si dovrebbero anche elencare le difficoltà, tutte quelle alla fine superate. Gli astrofisici hanno attentamente esaminato la radiazione di microonda al fine di misurare le temperature in zone differenti del cielo. Il fatto che queste temperature coincidessero con straordinaria precisione (con un margine inferiore allo 0,01%) causò qualche preoccupazione. Perché? Perché quando due oggetti hanno esattamente la stessa temperatura, è plausibile assumere che siano stati in contatto. Eppure gli esperti erano sicuri che le differenti regioni con la stessa temperatura non erano mai state in contatto, ma proprio *mai*.

Gli astrofisici sono legittimati a pronunciarsi in modo così categorico perché hanno calcolato quanto erano lontane due regioni del cielo al tempo in cui fu emessa la radiazione residua rilevata dal satellite COBE. Ciò successe 300.000 anni dopo il Big Bang, non così presto come vorremmo, ma meglio di così non possiamo fare. È risultato che queste distanze erano così grandi che anche alla velocità della luce non ci sarebbe stato il tempo perché le due regioni comunicassero fra loro. Eppure avevano la stessa temperatura, o quasi. La nostra teoria del Big Bang non poteva dare spiegazioni. Un fallimento? Un altro miracolo? Ciò divenne noto come crisi della causalità, o dell'isotropia. Della *causalità* perché sembrava esistere una connessione causale fra regioni del cielo che non avrebbero mai dovuto essere in contatto. Dell'*isotropia* perché dovunque voi rivolgiate lo sguardo, su larga scala vedete pressappoco la stessa configurazione

di stelle, galassie, ammassi di galassie e polvere cosmica. Si poteva far convivere tutto ciò con il modello del Big Bang dicendo che la similarità fra i miliardi di pezzi dell'universo che non sono mai stati in contatto era un mero accidente. Ma a noi non piacciono gli «accidenti». I miracoli vanno bene se investite denaro in una lotteria o se siete un fan dei Chicago Cubs, ma non per la scienza. Quando succedono, noi sospettiamo che qualcosa di più grande si celi nell'ombra. Torneremo fra poco su questo.

Un acceleratore senza limiti di spesa

Un secondo grande successo del modello del Big Bang ha a che fare con la composizione del nostro universo. Uno pensa che il mondo sia fatto di terra, aria, acqua (lascio da parte il fuoco) e delle bacheche in facoltà. Ma se lo guardiamo e lo misuriamo con i nostri telescopi spettroscopici, troviamo soprattutto idrogeno, e poi elio. Questi due elementi costituiscono il 98% dell'universo. Quello che resta è fatto degli altri novanta e passa elementi. Sappiamo dai nostri telescopi spettroscopici le percentuali degli elementi più leggeri e – guarda un po' – i teorici del Big Bang dicono che queste percentuali sono precisamente quelle che ci si dovrebbe aspettare. Ecco come facciamo a saperlo.

L'universo prenatale conteneva tutta la materia dell'universo presente, vale a dire circa 100 miliardi di galassie, ciascuna con i suoi 100 miliardi di soli (lo sentite Carl Sagan?). Tutto quello che possiamo vedere adesso era compresso in un volume molto più piccolo di una capocchia di spillo. E poi parliamo di sovraffollamento! La temperatura era alta, circa 10^{32} gradi Kelvin, più calda assai dei nostri attuali 3 gradi circa. Di conseguenza, la materia era scomposta nei suoi componenti primordiali. Un'immagine plausibile è quella di una «zuppa calda», o plasma, di quark e leptoni (o di qualsiasi cosa ci sia al loro interno, se c'è qualcosa) che si scontrano fra loro a energie come 10^{19} GeV, trilioni di volte l'energia della più grande macchina per collisioni che un fisico dell'era post-SSC possa immaginare di costruire. C'era poi la gravità, con la sua poderosa (ma allo stato attuale poco conosciuta) influenza a questa scala microscopica.

Dopo questo immaginario inizio, ci fu l'espansione e il raffreddamento. Con il raffreddamento le collisioni divennero meno violente. I quark, che erano in stretto contatto gli uni con gli altri come parte del denso globo dell'universo neonato, cominciarono a coagularsi in protoni, neutroni e negli altri adroni. Inizialmente, qualsiasi unione di

questo tipo si sarebbe spezzata nelle susseguenti violente collisioni, ma il processo di raffreddamento continuava senza sosta e le collisioni diventavano sempre più lievi e gentili. All'età di tre minuti, la temperatura era caduta a sufficienza per permettere ai protoni e ai neutroni di combinarsi e di formare dei nuclei stabili, là dove prima se ne sarebbero andati ciascuno per i fatti suoi. Questo fu il periodo della nucleosintesi, e dal momento che sappiamo molto di fisica nucleare, possiamo calcolare le percentuali degli elementi chimici che si formarono. Essi sono i nuclei di elementi molto leggeri; quelli più pesanti richiedono una «cottura a fuoco lento» nelle stelle. Naturalmente, gli atomi (nuclei più elettroni) non si formarono fino a che la temperatura non scese abbastanza da permettere agli elettroni di organizzarsi attorno ai nuclei. Alla giusta temperatura si arrivò dopo circa 300.000 anni. Prima di quel tempo non c'erano atomi, e perciò niente chimica. Una volta che si formarono degli atomi neutri, i fotoni poterono muoversi liberamente, ed ecco perché noi abbiamo potuto osservare la nostra microonda fotonica solo più tardi.

La nucleosintesi fu un successone. Le quantità misurate erano in accordo con quelle calcolate. Wow! E dal momento che i calcoli erano un raffinato cocktail di fisica nucleare, reazioni deboli e ipotesi circa le condizioni iniziali dell'universo, questo accordo fornisce un sostegno empirico molto forte per la teoria del Big Bang.

Raccontando questa storia ho anche avuto modo di spiegare la connessione spazio interno/spazio esterno. L'universo primitivo non era altro che un acceleratore di particelle senza limitazioni finanziarie. I nostri astrofisici dovevano sapere tutto di quark e leptoni e forze per poterne modellare l'evoluzione. E, come abbiamo sottolineato nel capitolo VI, anche i fisici delle particelle ricevono dati dal Suo Grande Esperimento. Naturalmente, va detto che non siamo molto sicuri della validità delle nostre leggi fisiche per l'epoca dell'universo anteriore a 10^{-13} secondi.

Nonostante ciò, continuiamo a fare progressi nella comprensione del Big Bang e dell'evoluzione dell'universo. Le nostre osservazioni sono effettuate 15 miliardi di anni dopo l'evento. Informazioni che sono andate girovagando per l'universo durante tutto questo tempo, di tanto in tanto finiscono nei nostri osservatori. Dalla nostra parte ci sono anche il modello standard e i dati forniti dagli acceleratori che sostengono il modello e cercano di estenderlo. Ma i teorici sono impazienti; i dati forniti dagli acceleratori si fermano a un livello energetico equivalente a quello di un universo con 10^{-13} secondi di vita. Gli astrofisici hanno bisogno di conoscere le leggi operative

ancora più indietro nel tempo, così pungolano i teorici delle particelle affinché si rimbocchino le maniche e contribuiscano all'alluvione di pubblicazioni scientifiche: la teoria di Higgs, l'unificazione, quello che c'è dentro i quark, e un brulicare di teorie speculative che vanno oltre il modello standard tentando di costruire un ponte verso una più completa descrizione della natura e una strada che porti al Big Bang.

Ci sono teorie, teorie, teorie...

È l'una e un quarto di notte e sono nel mio studio. Là fuori la macchina del Fermilab sta facendo scontrare protoni e antiprotoni. Due grandi rivelatori stanno ricevendo i dati. Il veterano gruppo del CDF, costituito da 342 fra scienziati e studenti, è indaffarato nel controllare i nuovi pezzi del rivelatore da 5000 tonnellate. Non tutti insieme, naturalmente. Una dozzina di persone, in media, è in questo momento nella sala di controllo. Attorno all'anello si sta mettendo a punto il nuovo rivelatore D-Zero, che impegna un'équipe di 321 persone. La sua entrata in servizio, un mese fa, ha avuto come al solito dei problemi, ma la raccolta dei dati andrà avanti per circa sedici mesi, con una sosta per poter installare un nuovo pezzo dell'acceleratore destinato ad accrescere il tasso di collisioni. Sebbene il compito principale sia quello di trovare il quark «alto», controllare ed estendere il modello standard costituisce una parte essenziale dell'impresa.

A circa 8000 chilometri di distanza, i nostri colleghi del CERN stanno anch'essi lavorando duro per controllare sperimentalmente svariate idee e teorie riguardo alle possibili estensioni del modello standard. Ma mentre questi lavori, puliti puliti, sono in corso, i fisici teorici stanno anche loro lavorando, e adesso devo fermarmi per dare una versione alla buona, e molto breve, di tre delle loro più intriganti teorie: GUT, supersimmetria e superstringhe. Sarà inevitabilmente superficiale, perché alcune di queste speculazioni sono veramente profonde e possono essere apprezzate solo dai loro creatori, le loro mamme e un ristretto circolo di amici.

Ma prima una parola di commento sul termine «teoria», che si presta a fraintendimenti molto diffusi. «Questa è la *tua* teoria» è un'espressione comune non precisamente elogiativa. Oppure: «Questa è solo una teoria». La colpa per questo uso facilone del termine è nostra. La teoria dei quanti e la teoria di Newton sono parti ben confermate della nostra visione del mondo. Non sono in dubbio. È una

questione genetica. C'era una volta la «teoria» di Newton (non ancora verificata). Poi venne verificata, ma il nome è rimasto, e sarà per sempre «la teoria di Newton». D'altra parte, superstringhe e GUT sono degli sforzi speculativi per estendere la conoscenza attuale, a partire da quello che sappiamo. Le teorie migliori sono quelle verificabili. Una volta questa era la *condicio sine qua non* di una teoria. Oggi, quando studiamo il Big Bang, affrontiamo, forse per la prima volta, una situazione in cui una teoria non potrà mai essere controllata sperimentalmente.

GUT

Ho descritto l'unificazione delle interazioni debole ed elettromagnetica nell'interazione elettrodebole, trasportata da un quartetto di particelle: W^+, W^-, Z^0 e il fotone. Ho anche descritto la cromodinamica quantistica (QCD), che si occupa di quark, che hanno tre colori, e gluoni. Queste forze sono ora ambedue descritte dalla teoria quantistica dei campi che obbedisce alla simmetria di gauge.

I tentativi di unire la QCD con l'interazione elettrodebole vanno sotto il nome collettivo di «teorie della grande unificazione» (*Grand Unification Theories*, GUT). L'unificazione elettrodebole diventa evidente in un mondo la cui temperatura superi i 100 GeV (approssimativamente la massa di W, ovvero 10^{15} gradi Kelvin). Come raccontato nel capitolo VIII, possiamo raggiungere questa temperatura in laboratorio. L'unificazione prevista dalle GUT, d'altro canto, richiede una temperatura di 10^{15} GeV, il che la mette al di là delle possibilità del più megalomane costruttore di acceleratori. Questa stima si ottiene dai tre parametri che misurano l'intensità delle interazioni debole, elettromagnetica e forte. C'è dell'evidenza a favore dell'ipotesi che questi parametri cambino con l'energia, quella forte diventando debole, e l'elettromagnetica più forte. L'assimilazione dei tre numeri si ha con un'energia di 10^{15} GeV. Questo è il regime della grande unificazione, un luogo dove la simmetria delle leggi di natura è ristabilita a più alto livello. Questa è una teoria ancora da verificare, ma l'orientamento delle intensità misurate sembra indicare una convergenza attorno a quel livello energetico.

C'è un certo numero di teorie della grande unificazione, anzi un *gran* numero, e tutte hanno i loro pro e contro. Per esempio, una delle più vecchie entrate nella hit-parade delle GUT prevedeva che il protone fosse instabile e che decadesse in un pione neutro e in un positrone. Il tempo di vita di un protone, secondo questa teoria, è

10^{30} anni. Dal momento che l'età dell'universo è considerevolmente inferiore – qualcosina in più di 10^{10} anni – non troppi protoni devono essere decaduti. Il decadimento di un protone sarebbe un evento spettacolare. Ricorderete che noi, invece, avevamo considerato il protone un adrone stabile, e questa era una buona cosa, in verità, perché un protone ragionevolmente stabile è molto importante per il futuro dell'universo e dell'economia del paese. Ora, nonostante il tasso di decadimento atteso sia molto basso, l'esperimento è fattibile. Se il tempo di vita è veramente di 10^{30} anni, e noi osserviamo un solo protone per un anno, la nostra probabilità di vederne il decadimento è solo 1 diviso 10^{30}: ovvero 10^{-30}. Ma noi possiamo osservare invece moltissimi protoni. In 10.000 tonnellate d'acqua ci sono circa 10^{33} protoni (credetemi). Questo comporta che 1000 protoni dovrebbero decadere in un anno.

Così alcuni intraprendenti scienziati sono andati sottoterra – in una miniera di sale sotto il lago Erie in Ohio, in una miniera di piombo sotto il monte Toyama in Giappone e nel traforo del monte Bianco – in modo da essere protetti dalla radiazione cosmica di fondo. In questi tunnel e pozzi minerari hanno sistemato dei grandi contenitori di plastica, ciascuno contenente circa 10.000 tonnellate d'acqua pura, dei cubi di oltre venti metri di lato. Nei contenitori sono stati piazzati dei sensori fotomoltiplicatori, che dovrebbero rilevare le esplosioni d'energia rilasciate dal decadimento di un protone. Fino a ora nessun decadimento protonico è stato osservato. Ciò non significa che questi ambiziosi esperimenti non abbiano avuto alcun valore, perché essi hanno stabilito un nuovo limite per la vita del protone. Tenendo conto del margine di affidabilità dell'esperimento, la vita del protone, se davvero è instabile, deve essere *più lunga* di 10^{32} anni.

La lunga e frustrata attesa del decadimento protonico venne ravvivata da un fatto inatteso. Vi ho già detto dell'esplosione della supernova del febbraio 1987. I rivelatori sotterranei del lago Erie e del monte Toyama osservarono simultaneamente un'esplosione di neutrini. L'arrivo combinato sulla Terra della luce e dei neutrini provenienti dalla supernova concordava dannatamente bene con i modelli di deflagrazione stellare. Non vi dico gli astronomi! Ma i protoni, niente, non volevano saperne di decadere.

I teorici delle GUT avevano subito un brutto colpo, ma essendo buoni incassatori, non hanno mollato. Non c'è bisogno di costruire un acceleratore per controllare la teoria. Le teorie GUT hanno altre conseguenze osservabili, oltre al decadimento protonico. Per esempio,

SU(5), un'altra delle teorie della grande unificazione, prevede retrospettivamente che la carica elettrica delle particelle sia quantizzata, e che debba arrivare in multipli di un terzo della carica dell'elettrone. (Ricordate le cariche dei quark?) Molto bene. Un'altra conseguenza è il consolidamento dei quark e dei leptoni in un'unica famiglia. Secondo questa teoria, i quark (dentro il protone) possono convertirsi in leptoni e viceversa.

Le GUT predicono anche l'esistenza di particelle superpesanti (i bosoni X) che sono un milione di miliardi di volte più pesanti dei protoni. La mera possibilità che esistano e possano apparire come particelle virtuali ha delle conseguenze piccole, ma molto piccole, come il decadimento protonico. Incidentalmente, la previsione di questo decadimento ha delle implicazioni pratiche, anche se molto remote. Se, per esempio, il nucleo dell'idrogeno (un solo protone) potesse convertirsi in pura radiazione, fornirebbe una fonte d'energia centinaia di volte più efficiente della fusione nucleare. Poche tonnellate d'acqua basterebbero al consumo energetico giornaliero di tutti gli Stati Uniti. Naturalmente, adesso come adesso dovremmo riscaldare l'acqua alle temperature richieste dalle GUT, ma forse qualche bambino disamorato nei confronti della scienza da qualche inesperto maestro elementare potrebbe essere colui che in futuro avrà l'idea giusta per rendere fattibile tutto ciò. Perciò, attenti ai maestri!

Alle temperature prescritte dalle GUT (10^{28} gradi Kelvin) la simmetria e la semplicità hanno raggiunto il punto in cui c'è solo un tipo di materia (lepto-quark?) e una forza con la sua corte di particelle-vettori e... già, dimenticavo, la gravità, che è sempre là ma non sappiamo dove metterla.

Susy

La supersimmetria, detta Susy, resta la favorita fra i teorici che amano scommettere. Siamo già stati presentati a Susy. Questa teoria unifica le particelle di materia (quark e leptoni) e i vettori delle forze (gluoni, W, eccetera). Fa un gran numero di predizioni sperimentali, nessuna delle quali è stata (finora) osservata. Ma ci si diverte un sacco!

Abbiamo gravitini e wini e gluini e fotini, i partner materiali di gravitoni, W e tutto il resto. Abbiamo partner supersimmetrici di quark e leptoni: squark e sleptoni, rispettivamente. Spetta alla teoria l'onere di mostrare perché questi partner, uno per ciascuna delle particelle conosciute, non siano stati mai visti. «Be', vi ricordate dell'antimateria?» dicono i teorici. Fino agli anni Trenta non si sarebbe neppure sognato che ogni particella ha la sua antiparticella gemella. E tenete presente che le simmetrie sono fatte per essere rotte (come gli specchi?). I partner delle particelle non sono stati visti perché sono pesanti. Costruite una macchina grande abbastanza e appariranno.

I matematici ci assicurano che la teoria possiede una splendida simmetria nonostante l'antiestetico proliferare di particelle. Susy promette anche di condurci a una vera teoria quantistica della gravitazione. I tentativi di quantizzare la teoria generale della relatività – la nostra teoria della gravitazione – sono stati frustrati dall'apparizione di quantità infinite che non potevano essere rinormalizzate. Susy ci promette una bellissima teoria quantistica della gravitazione.

Susy rende civile anche la particella di Higgs, la quale, senza questa simmetria, non potrebbe fare il lavoro per il quale è stata inventata. La particella di Higgs, essendo un bosone scalare (con spin zero), è particolarmente sensibile al vuoto assai trafficato attorno a essa. La sua massa è influenzata da tutte le masse delle particelle virtuali che occupano temporaneamente il suo spazio, ciascuna dando il proprio contributo d'energia, e perciò massa, fino a che la povera particella di Higgs diventerebbe così obesa da non poter salvare la teoria elettrodebole. Ciò che succede con la supersimmetria è che i partner chiamati in causa da Susy influenzano la massa della particella di Higgs con i loro segni opposti. Cioè la particella W la rende più pesante, ma wino controbilancia l'effetto, e così la teoria le permette di avere una massa utile. Ma tutto questo non prova che Susy è vera. Semplicemente, è bello.

La questione è lungi dall'essere risolta. Strane parole ronzano nell'aria: supergravità, la geometria del superspazio (una matematica elegante, complessa in modo scoraggiante). Ma una conseguenza sperimentale intrigante è che Susy offre volenterosamente e generosamente dei candidati per la materia oscura, particelle stabili e neutre che potrebbero essere abbastanza pesanti per rendere conto di questo pervasivo ed evasivo materiale che permea l'universo osservabile. Le particelle teorizzate da Susy vennero presumibilmente prodotte all'epoca del Big Bang, e le più leggere fra queste particelle – forse il fotino, l'higgsino o il gravitino – potrebbero sopravvivere ancora come residui stabili e costituenti della materia oscura e fare felici gli astronomi. La prossima generazione di macchine deve confermare o smentire Susy... quel gran pezzo di figliola!

Superstringhe

Credo che sia stata la rivista «Time» ad abbellire per sempre il lessico della fisica delle particelle propagandando questa teoria come la «Teoria del Tutto». Un recente libro l'ha messa ancora meglio: *Superstringhe, Teoria del Tutto?* (va letto con inflessione crescente). La teoria delle stringhe promette una descrizione unificata di tutte le forze, anche della gravità, di tutte le particelle, dello spazio e del tempo, senza parametri arbitrari e quantità infinite. In breve: di tutto. Alla base c'è la sostituzione delle particelle puntiformi con corti segmenti di stringhe. La teoria è caratterizzata da una struttura che spinge le frontiere della matematica (come la fisica ha raramente fatto in passato) e l'immaginazione umana agli estremi limiti. La sua creazione ha la sua propria storia e i suoi eroi: Gabrielle Veneziano, John Schwarz, André Neveu, Pierre Ramond, Jeff Harvey, Joel Sherk, Michael Green, David Gross e un dotato pifferaio magico di nome Edward Witten. Quattro degli eminenti creatori della teoria lavoravano insieme in un'oscura istituzione nel New Jersey e sono diventati noti come il «quartetto per stringhe di Princeton».

La teoria delle stringhe è una teoria che riguarda un posto molto lontano, almeno tanto lontano quanto Atlantide o Oz. Stiamo parlando del dominio di Planck, che avrebbe dovuto esistere, se è mai esistito (come Oz), nei primi tremolanti istanti della cosmologia del Big Bang. Non c'è modo di poter immaginare di avere dati sperimentali relativi a quell'epoca. Ciò non vuol dire che non dobbiamo perseverare. Supponiamo che si trovi una teoria matematica coerente (niente infiniti) che in qualche modo descriva Oz e che abbia come sua conseguenza a energie molto molto basse il nostro modello standard. Se poi fosse anche unica – le sue rivali non sono in grado di dare lo stesso risultato – non esulteremmo tutti quanti tirando finalmente alle ortiche penne e cazzuole? L'unicità è quello che le superstringhe non hanno. Fra le principali assunzioni della teoria delle superstringhe c'è un numero enorme di possibili percorsi che conducono al mondo che osserviamo. Vediamo che cos'altro caratterizza questa roba, senza però pretendere di spiegarla. Ah già, come abbiamo menzionato nel capitolo VIII, essa richiede dieci dimensioni: nove spaziali e una temporale.

Ora tutti noi sappiamo che ci sono solo tre dimensioni spaziali, sebbene abbiamo cercato di vivacizzare un po' l'ambiente immaginando di vivere in un mondo bidimensionale. Allora perché non nove? «E dove stanno?» chiederete voi giustamente. Arrotolate. Arro-

tolate? Ebbene, la teoria comincia con la gravità, che è basata sulla geometria, così si possono visualizzare sei delle dimensioni come fossero arrotolate in una piccola palla. La grandezza della palla è tipica del dominio di Planck, 10^{-33} centimetri, all'incirca la dimensione della stringa che rimpiazza la particella puntiforme. Le particelle che noi conosciamo emergono come vibrazioni di queste stringhe. Una corda pizzicata (o un cavo) ha un numero infinito di modi di vibrazione. Questa è la base della musica per violino (o liuto, se ritornate con la memoria a quando incontrammo il buon vecchio Galileo). Le vibrazioni delle corde vere sono classificate nei termini di una nota fondamentale e delle sue armonie o modulazioni di frequenza. La matematica delle microstringhe è simile. Le nostre particelle provengono dalle modulazioni di frequenza più basse.

Non c'è modo in cui io possa descrivere l'eccitazione dei leader di questa teoria. Ed Witten diede una fantastica, coinvolgente lezione al Fermilab alcuni anni fa. Per la prima volta da quando ho cominciato a partecipare a conferenze di fisica, al termine della lezione ci furono quasi dieci secondi di silenzio (che è molto!) prima dell'applauso. Io corsi al laboratorio per spiegare anche ai miei colleghi che non avevano potuto partecipare quello che avevo imparato, ma non feci in tempo ad arrivare che la maggior parte mi era già sfuggita di mente. Il grande conferenziere vi fa credere che voi lo stiate capendo.

Man mano che la teoria ha incontrato maggiori difficoltà matematiche e una proliferazione di percorsi possibili, l'interesse che circondava le superstringhe è sceso, e oggi come oggi possiamo solo aspettare. C'è un continuo interesse da parte dei teorici più dotati, ma io ho il sospetto che passerà molto tempo prima che il modello standard possa essere derivato dalla «Teoria del Tutto».

Uniformità e materia oscura

Aspettando che una teoria venga al salvataggio, il Big Bang ha ancora problemi. Ne sceglierò uno che ha confuso noi fisici e al tempo stesso ci ha condotti – sperimentali e teorici insieme – ad alcune solleticanti nozioni circa l'Inizio. È conosciuto come il problema dell'uniformità e ha un versante molto umano, il morboso interesse volto a sapere se l'universo continuerà a espandersi per sempre o se rallenterà fino a invertire il processo, contraendosi fino a scomparire. La questione è quanta massa gravitazionale c'è nell'universo. Se ce n'è abbastanza, l'espansione verrà invertita e ci

sarà il Big Crunch.* Questo è conosciuto come il modello dell'«universo chiuso». Se non ce n'è abbastanza, l'universo continuerà a espandersi per sempre, diventando sempre più freddo (è il modello dell'«universo aperto»). Fra questi due estremi si trova un universo con una «massa critica», cioè sufficiente a rallentare l'espansione, ma non abbastanza per rovesciarla: un universo cosiddetto «uniforme».

Pensiamo una metafora. Immaginate un razzo lanciato dalla superficie terrestre. Se non ha velocità sufficiente, ricasca sulla Terra (universo chiuso). La forza di gravità del pianeta è troppo potente. Se gli diamo una grande velocità, può sfuggire alla forza di gravità della Terra ed entrare nel sistema solare (universo aperto). Ovviamente c'è una velocità critica appena al di sotto della quale precipiterebbe sulla Terra e appena al di sopra della quale uscirebbe dall'orbita terrestre. L'uniformità si ha quando la velocità è quella giusta. Il razzo riesce a sfuggire, ma a velocità sempre decrescente. Per razzi terrestri la velocità critica è di 11,3 chilometri al secondo. Adesso, proseguendo con l'esempio, pensate a un razzo con velocità prefissata (il Big Bang) e chiedetevi quanto pesante debba essere un pianeta (la densità totale della massa dell'universo) perché il razzo riesca a sfuggire o caschi giù.

Si può stimare la massa gravitazionale dell'universo contando le stelle. Qualcuno l'ha fatto, e il numero che viene fuori è troppo piccolo per fermare l'espansione; esso prevede un universo aperto, e con un margine molto ampio. C'è però dell'evidenza empirica molto forte a favore dell'esistenza di una materia non radiante, la «materia oscura», distribuita nell'universo. Quando la materia osservata e la materia oscura stimata sono sommate, la massa dell'universo si avvicina alla massa critica (non meno del 10% e non più di due volte il suo valore). Perciò se l'universo continuerà a espandersi o si contrarrà è ancora una questione aperta.

Ci sono molti candidati per il ruolo di materia oscura. La maggior parte sono particelle, naturalmente, con nomi fantasiosi: assioni, fotini, e via inventando. Una delle possibilità più affascinanti è che si tratti di uno o più dei neutrini del modello standard. Dovrebbe esserci un'enorme densità di questi elusivi oggetti lasciatici in eredità dal Big Bang. Sarebbero dei candidati ideali se... se avessero una massa a riposo finita. Noi sappiamo già che il neutrino elettronico è troppo leggero, il che lascia due candidati, dei quali il neutrino tauonico è il favorito. Per due ragioni: (1) esiste, e (2) non sappiamo quasi nulla della sua massa.

* Cioè «grande contrazione». (*NdT*)

Non molto tempo fa conducemmo al Fermilab un ingegnoso e sottile esperimento per rilevare se il neutrino tauonico abbia una massa finita che servirebbe a «chiudere» l'universo. (Vedete qui come un problema cosmologico porti a un esperimento con l'acceleratore, un'indicazione dell'unione tra fisica delle particelle e cosmologia.)

Immaginate un dottorando al lavoro in una triste notte d'inverno, rinchiuso in una piccola capanna elettronica nel mezzo della prateria dell'Illinois battuta dal vento. I dati si sono accumulati per otto mesi. Egli controlla il progredire dell'esperimento, e come parte della sua routine esamina i dati sull'effetto della massa del neutrino. (Non si può misurare la massa direttamente, ma l'influenza che la massa avrebbe su certe reazioni.) Egli scorre i calcoli fatti sul campione di dati.

«E questo che cos'è?» Improvvisamente gli si drizzano le antenne. Non può credere a quello che appare sullo schermo. «Mio Dio!» Si affretta a fare dei controlli sul computer. Sono tutti positivi. Eccola, la massa! Abbastanza per «chiudere» l'universo. Questo ventiduenne studente sta provando l'incredibile esperienza mozzafiato di essere il solo su tutto il pianeta, tra i 5 miliardi e mezzo di suoi simili, a conoscere il futuro dell'universo. Eureka!

È una storia carina su cui riflettere. La parte sullo studente nella casetta sperduta nel mezzo della prateria è vera, ma l'esperimento non rilevò nessuna massa. Quel particolare esperimento non era abbastanza buono, ma avrebbe potuto esserlo, e forse un giorno quello buono si farà. Collega lettore, leggi per favore *con brio** questo pezzo a tuo figlio incerto su quale carriera intraprendere. Digli, o dille, che (1) gli esperimenti spesso falliscono, e (2) non sempre falliscono.

Charlton, Golda e Guth

Ma anche se non sappiamo ancora *come* l'universo contenga la massa critica necessaria per un universo uniforme, siamo piuttosto sicuri che la contenga. Vediamo perché. Di tutte le masse che la natura avrebbe potuto scegliere per il Suo universo (da 10^6 volte la massa critica a 10^{-16} volte la massa critica), Lei, l'Onnipotente, ha scelto qualcosa quasi uniforme. In effetti è anche peggio di così. Sembra un miracolo che l'universo sia scampato ai due opposti fati – immediata espansione incontrollata o immediato collasso – per ben 15 miliardi di anni. L'uniformità all'età di un secondo doveva

* In italiano nel testo. (*NdT*)

essere prossima alla perfezione. Se avesse deviato anche di pochissimo in un senso, avremmo avuto il Big Crunch anche prima che un solo nucleo venisse prodotto; se la deviazione fosse stata nell'altro senso, l'espansione dell'universo avrebbe proceduto a un ritmo tale da farne già adesso una cosa fredda e morta. Ancora un miracolo! Per quanto come scienziati possiamo immaginarci l'Onnipotente, un tipo alla Charlton Heston con un lunga barba finta e un'aureola laser, sebbene, per conto mio, abbia in mente più una Margaret Mead o una Golda Meir o una Margaret Thatcher, il nostro contratto dice chiaramente che le leggi di natura non si possono emendare a piacere, che esse sono quel che sono. Perciò il problema dell'uniformità non si può risolvere con un miracolo e si devono cercare delle cause che rendano l'uniformità «naturale». Ecco perché il mio dottorando si stava congelando il sedere cercando di stabilire se i neutrini sono la materia oscura oppure no. Espansione infinita o Big Crunch. Egli voleva saperlo. E così noi.

Il problema dell'uniformità, il problema della radiazione uniforme a 3 gradi e svariati altri problemi del modello del Big Bang sono stati risolti, almeno teoricamente, nel 1980 da Alan Guth, un teorico delle particelle del MIT. Il suo passo avanti è conosciuto come il modello inflazionario del Big Bang.

L'inflazione e la particella scalare

In questa breve storia dei passati 15 miliardi di anni ho dimenticato di dire che l'evoluzione dell'universo è quasi tutta contenuta nelle equazioni della relatività generale di Einstein. Una volta che la temperatura dell'universo sia scesa a 10^{32} gradi Kelvin, la relatività classica (non quantistica) prende il sopravvento e gli eventi successivi sono conseguenze della teoria di Einstein. Sfortunatamente, questa grande potenza della teoria della relatività venne scoperta non dal maestro, ma dai suoi seguaci. Nel 1916, prima di Hubble e di Knubble, si pensava che l'universo fosse un oggetto molto più statico e immutabile, e Einstein stesso aggiunse un termine alla sua equazione per evitare l'espansione che essa prediceva, cosa che venne da lui considerata «il più grande errore». Dal momento che questo non è un libro di cosmologia (ce ne sono comunque alcuni eccellenti sul mercato), non renderà piena giustizia alle idee qui coinvolte, molte delle quali, del resto, sono al di sopra della capacità di comprensione per la quale ricevo uno stipendio.

Ciò che Guth ha scoperto è un processo, compatibile con le equazioni di Einstein, che genererebbe una forza così grande da produrre un'espansione incontrollata; l'universo si sarebbe espanso nel giro di 10^{-33} secondi circa da dimensioni molto più piccole di quelle di un protone (10^{-15} metri) alla dimensione di una palla da golf. Questa fase inflazionaria di sviluppo ebbe luogo sotto l'influenza di un nuovo campo, un campo non direzionale (scalare), un campo che ha l'aspetto, le movenze, l'odore di quello di... Higgs!

Higgs! Gli astrofisici hanno scoperto una cosa come il campo di Higgs in un contesto interamente nuovo. Qual è il ruolo del campo di Higgs nel promuovere questo bizzarro evento che chiamiamo inflazione e che ha preceduto la fase di espansione?

Abbiamo notato come il campo di Higgs sia strettamente legato al concetto di massa. Ciò che induce l'inflazione selvaggia è l'ipotesi che l'universo preinflazionario fosse permeato da un campo di Higgs il cui contenuto energetico sarebbe stato così alto da provocare un'espansione molto rapida. Dire «In principio c'era un campo di Higgs» potrebbe non essere troppo lontano dal vero. Il campo di Higgs, che è costante nello spazio, cambia con il tempo, in accordo con le leggi della fisica. Queste leggi (aggiunte alle equazioni di Einstein) generano la fase inflazionaria, che dura l'enorme intervallo di tempo fra 10^{-35} secondi e 10^{-33} secondi dopo la Creazione. I cosmologi descrivono lo stato iniziale come un «finto vuoto» perché in realtà avrebbe contenuto l'energia del campo di Higgs. La transizione definitiva a un autentico vuoto avviene con il rilascio di questa energia sotto forma di particelle e radiazione di fondo, il tutto alle enormi temperature dell'Inizio. Dopo di ciò, comincerebbe la più familiare fase del Big Bang, fatta di una relativamente tranquilla espansione con raffreddamento. L'universo raggiunge la maggiore età a 10^{-33} secondi. Possiamo ancora adesso udire l'eco di una voce: «Oggi sono un universo».

Avendo donato tutta la sua energia per la creazione delle particelle, il campo di Higgs sarebbe temporaneamente andato in pensione, facendo la sua riapparizione in diverse occasioni e sotto mentite spoglie al fine di salvare le equazioni da certe incoerenze, eliminare le infinità e tenere sotto la sua supervisione la crescente complessità prodotta da particelle e forze che continuavano a differenziarsi. Ecco la particella di Dio in tutto il suo splendore.

Aspettate. Non ho inventato nulla di quel che ho detto. Il creatore della teoria, Alan Guth, era un giovane fisico delle particelle che cercava di risolvere un problema in apparenza totalmente differente: il modello standard del Big Bang prevedeva l'esistenza di monopoli

magnetici, vale a dire poli singoli isolati. Nord e sud sarebbero allora in relazione fra loro come la materia e l'antimateria. La ricerca dei monopoli divenne per un tempo il gioco favorito dei cacciatori di particelle, e ogni nuova macchina andava alla loro caccia. Ma nessuno ebbe successo. I monopoli sono dunque perlomeno molto rari, contrariamente a quanto previsto dalla cosmologia. Guth, che era un cosmologo dilettante, arrivò all'idea dell'inflazione come a una maniera di eliminare i monopoli dalla cosmologia del Big Bang; e solo in seguito scoprì che, migliorando la sua idea, si potevano eliminare anche tutti gli altri difetti di quella cosmologia. Guth ebbe in seguito modo di commentare quanto fortunato fosse stato nel fare questa scoperta, perché tutte le componenti erano in realtà già note (a proposito dell'importanza di essere candidi per essere creativi: Wolfgang Pauli una volta si lamentò del suo essere troppo smaliziato: «Ach, io la so lunga, troppo»).

Per completare questo omaggio finale a Higgs, dovrei spiegare brevemente in che modo questa rapida espansione risolva la crisi dell'isotropia, o della causalità, e quella dell'universo uniforme. L'inflazione, che ha luogo a una velocità molto più alta di quella della luce (la teoria della relatività non fissa limiti alla velocità con cui lo spazio può espandersi), è proprio il cacio sui maccheroni. All'inizio, piccole regioni dell'universo erano in intimo contatto. L'inflazione espanse moltissimo queste regioni, separando le loro parti in regioni causalmente sconnesse. Dopo il periodo di crescita inflazionaria, l'espansione divenne lenta rispetto alla velocità della luce, e così noi continuiamo a scoprire nuove regioni dell'universo man mano che la loro luce ci raggiunge. «Ah» dice la solita vocina cosmica, «ci incontriamo di nuovo.» Adesso non è più sorprendente scoprire che queste regioni sono proprio come la nostra: ecco l'isotropia!

L'universo uniforme? Il modello inflazionario afferma chiaramente che l'universo ha la massa critica; l'espansione continuerà per sempre, rallentando via via, ma senza mai invertirsi. Perché uniforme? Nella teoria della relatività generale di Einstein, tutto è geometria. La presenza della massa causa la curvatura dello spazio: maggiore la massa, maggiore la curvatura. Un universo uniforme sta in una condizione critica fra due opposti tipi di curvatura. Una grande massa genera una curvatura concava dello spazio, come la superficie di una sfera. Questa è attrattiva e tende a un universo chiuso. Una piccola massa genera una curvatura convessa, come il dorso di una sella. Questa tende a un universo aperto. L'universo uniforme possiede una massa critica che sta «nel mezzo». La crescita inflazionaria produce l'effetto di «stirare» un piccolo spazio curvo trasformandolo in una grande superficie praticamente piatta. La previsione di un universo perfettamente uniforme, situato criticamente fra espansione e contrazione, può essere controllata sperimentalmente identificando la materia oscura e continuando nel processo di misurazione della densità della massa, cosa che sarà fatta, ci assicurano gli astronomi.

Ma altri successi del modello inflazionario hanno contribuito a guadagnargli una buona reputazione. Per esempio, uno dei problemi «minori» della cosmologia del Big Bang è che essa non spiega la disomogeneità dell'universo: l'esistenza delle galassie, delle stelle e di tutto il resto. Qualitativamente, questa disomogeneità non sembra problematica. A causa di fluttuazioni casuali, della materia forma dei grumi all'interno di un plasma quasi omogeneo. La leggera attrazione gravitazionale esercitata dai grumi attrae altra materia, aumentando ancora la forza di gravità. Il processo continua, e prima o poi otteniamo una galassia. Ma un'analisi dettagliata mostra che, se dipendesse solo da «fluttuazioni casuali», il processo sarebbe troppo lento, e bisogna trarre la conclusione che i semi delle galassie sono stati piantati durante la fase inflazionaria.

I teorici che hanno riflettuto su questi semi li immaginano come piccole (meno dello 0,1%) variazioni di densità nella distribuzione iniziale della materia. Da dove venivano questi semi? L'inflazione di Guth fornisce una risposta molto attraente. Bisogna risalire alla fase quantistica della storia dell'universo, dove spettrali fluttuazioni quanto-meccaniche possono produrre le irregolarità. L'inflazione allarga poi queste microscopiche fluttuazioni su una scala commisurata a quella delle galassie. Recenti osservazioni (aprile 1992) effettuate dal satellite COBE rivelano delle variazioni così piccole della temperatura della radiazione di fondo in direzioni differenti, da essere deliziosamente in accordo con lo scenario inflazionario.

Quello che vede il satellite COBE riflette le condizioni dell'universo quando era giovane – solo 300.000 anni – e marcato dalle distribuzioni indotte dall'inflazione che rendevano la radiazione di fondo più calda dove era meno densa e più fredda dove era più densa. Le differenze di temperatura osservate forniscono perciò evidenza empirica a favore dell'esistenza dei semi delle galassie. Nessuna meraviglia che la notizia abbia guadagnato dei titoli su tutti i giornali del mondo. Le differenze di temperatura erano di pochi milionesimi di grado soltanto e richiedevano una straordinaria precisione sperimentale, ma che differenza facevano! Abbiamo potuto registrare la prova evidente di quella disomogeneità che presagiva le galassie, i

soli, i pianeti e noi. «È stato come vedere la faccia di Dio» ha detto l'esuberante astronomo George Smoot.

Heinz Pagels ha filosoficamente fatto notare come la fase inflazionaria sia la torre di Babele universale, quella che ci ha tagliati fuori da tutto quanto è successo prima. Essa ha stirato e diluito tutte le strutture preesistenti. Così, sebbene adesso abbiamo una bella storia su quanto è successo fra 10^{-33} secondi e 10^{17} secondi (dove ci troviamo adesso), ci sono sempre dei rompiscatole che chiedono: «Va bene, ma l'universo come è cominciato?».

Nel 1987 un gruppo di astro-cosmo-fisici si è radunato al Fermilab per una sorta di conferenza che avrebbe potuto intitolarsi «La faccia di Dio», sull'origine dell'universo. Il suo titolo ufficiale era, per la verità, «Cosmologia quantistica», ed era stata organizzata per offrire agli esperti un luogo dove lagnarsi di quanto poco sappiamo sull'argomento. Non esiste una soddisfacente teoria della gravità quantistica e, fino a quando non l'avremo, non ci sarà modo di capire qualcosa della situazione fisica dell'universo nei suoi primissimi istanti di vita.

Il tavolo della conferenza era un *Who's Who* di questa esotica disciplina: c'erano Stephen Hawking, Murray Gell-Mann, Yakov Zeldovich, André Linde, Jim Hartle, Mike Turner, Rocky Kolb e David Schramm, fra gli altri. La discussione fu astratta, matematica e molto vivace. Gran parte di essa passò sopra la mia testa. Ciò che più mi piacque fu la lezione di Hawking sull'origine dell'universo, data la domenica mattina, mentre altre 16.427 prediche, pressappoco sullo stesso argomento, venivano rivolte da 16.427 pulpiti sparsi per tutta la nazione. Eccetto che... Eccetto che il discorso di Hawking veniva pronunciato attraverso un sintetizzatore vocale, il che gli dava un tocco extra di autenticità. Come sempre, egli disse un sacco di cose interessanti e complicate, ma il pensiero più profondo lo espresse in modo piuttosto semplice. «L'universo è ciò che è perché era ciò che era» salmodiò quella domenica mattina.

Hawking stava dicendo che l'applicazione della teoria dei quanti alla cosmologia ha come scopo la specificazione delle condizioni iniziali che devono essere esistite nel momento stesso della creazione. La sua premessa è che le appropriate leggi di natura – che saranno formulate, speriamo, da qualche genio adesso alle elementari – a partire da quelle condizioni iniziali guideranno e descriveranno l'evoluzione successiva. La nuova grande teoria deve integrare una descrizione delle condizioni iniziali dell'universo con una perfetta comprensione delle leggi di natura e in questo modo spiegare tutte le osservazioni cosmologiche. Deve avere anche fra le sue conseguenze il modello standard degli anni Novanta. Se nel frattempo, prima di questa svolta teorica, siamo stati in grado di formulare, grazie ai dati del Super Collisore, un nuovo modello standard con un più conciso resoconto di tutti i dati raccolti dall'esperimento della torre di Pisa a oggi, meglio. Il nostro sarcastico Pauli una volta disegnò un rettangolo e dichiarò che aveva riprodotto il più bel quadro di Tiziano: mancavano solo i dettagli. In effetti, il nostro dipinto *Nascita ed evoluzione dell'universo* richiede solo qualche altro colpetto di pennello. Ma la cornice è tanto bella.

Prima che cominciasse il tempo

Torniamo ancora indietro all'universo prenatale. Noi viviamo in un universo di cui sappiamo parecchio. Come il paleontologo che ricostruisce un mastodonte da un frammento d'osso, o l'archeologo che può visualizzare una città morta da poche pietre antiche, noi siamo aiutati dalle leggi della fisica che emergono dai laboratori di tutto il mondo. Siamo convinti (anche se non lo possiamo provare) che solo una sequenza di eventi, seguita a ritroso, può condurre, tramite le leggi di natura, dall'universo osservato da noi a quello iniziale e a ciò che c'era «prima». Le leggi di natura devono essere esistite anche prima che il tempo cominciasse affinché potesse avere inizio il tutto. Lo diciamo e lo crediamo, ma possiamo provarlo? No. E che cosa possiamo dire su quello che c'era «prima che il tempo cominciasse»? A questo punto dobbiamo lasciare la fisica e fare della filosofia. Il concetto di tempo è legato all'accadere di eventi. Un accadimento marca un punto nel tempo. Due accadimenti definiscono un intervallo. Una sequenza regolare di accadimenti può definire un «orologio» (il battito cardiaco, l'oscillare di un pendolo, il sorgere e il calare del sole). Immaginate una situazione in cui non accade nulla. Nessun ticchettare d'orologio, niente ora di pranzo, non succede niente. Lo stesso concetto di tempo in questo mondo sterile non avrebbe senso. Così poteva essere lo stato dell'universo «prima». Il grande evento, il Big Bang, fu un accadimento formidabile che creò, fra le altre cose, il tempo.

Quello che sto dicendo è che, se non siamo in grado di definire un orologio, non possiamo attribuire un significato al tempo. Si consideri l'idea quantistica del decadimento di una particella, diciamo il nostro vecchio amico pione. Fino a che non decade, non c'è modo di determinare il tempo nell'universo del pione, perché nulla cambia. La sua struttura, a meno che non stiamo equivocando totalmente, resta identica senza alcun mutamento fino a quando decade, nella sua per-

sonale versione del Big Bang. Comparatelo con la nostra umana esperienza del decadimento di un *Homo sapiens*. Credetemi, ci sono un sacco di segni che la decadenza sta avanzando o è imminente! Nel mondo dei quanti, invece, le domande «Quando il pione decadrà?» o «Quando il Big Bang ebbe luogo?» sono prive di significato. Ce l'ha, invece, la domanda «Quanto tempo fa ebbe luogo il Big Bang?».

Possiamo tentare di immaginare l'universo prima del Big Bang: senza tempo, senza nulla, ma in qualche inimmaginabile modo soggetto alle leggi della fisica. Queste danno all'universo, come al pione destinato a decadere, una probabilità finita di esplodere, cambiare, subire una fase di transizione, un mutamento di stato. Qui possiamo perfezionare la metafora usata all'inizio del libro. Si compari ancòra l'universo ai suoi inizi a un grosso masso in cima a un precipizio, ma che adesso stia appoggiato in un avvallamento del terreno. Questo lo renderebbe stabile, secondo la fisica classica. La fisica quantistica, però, permette l'«effetto tunnel» – uno degli strambi effetti esaminati nel capitolo V – e il primo evento è l'apparizione del masso fuori dell'avvallamento e, oops, eccolo che cade nel precipizio, cade giù rilasciando la sua energia potenziale e creando l'universo come lo conosciamo. In modelli meno primitivi il nostro caro campo di Higgs fa la parte del precipizio.

È confortante visualizzare la sparizione dello spazio e del tempo non appena facciamo scorrere il film dell'universo all'indietro. Quello che succede quando spazio e tempo tendono a zero è che le equazioni che usiamo si annullano e diventano prive di significato. A questo punto stiamo proprio uscendo dalla scienza. E forse è bene che lo spazio e il tempo cessino di avere un significato; ci dà la possibilità di farne svanire dolcemente il concetto. Che cosa rimane? Ciò che rimane devono essere le leggi della fisica.

Quando si ha a che fare con tutte le nuove eleganti teorie sullo spazio, il tempo e il principio delle cose, si prova un'ovvia frustrazione. Contrariamente a quasi tutti gli altri periodi della storia della scienza – e certamente dal 1500 in poi – sembra che non ci sia modo di sperimentare e osservare, almeno non nel prossimo futuro. Perfino ai tempi di Aristotele uno poteva (a suo rischio e pericolo) contare i denti nella bocca di un caval donato per decidere il dibattito sul numero dei denti del caval donato. Oggi i nostri colleghi stanno dibattendo un soggetto che ha un'unica evidenza empirica: l'esistenza di un universo. E questo naturalmente ci riporta allo stravagante sottotitolo del nostro libro: l'universo è la risposta, ma che sia dannato se conosciamo la domanda.

Il ritorno del Greco

Erano quasi le cinque del mattino e stavo sonnecchiando sopra le ultime pagine del capitolo IX. Avrei dovuto consegnare il manoscritto già da lungo tempo, ma non ero affatto ispirato. Improvvisamente udii un trambusto all'esterno della nostra vecchia fattoria a Batavia. I cavalli nella stalla giravano in tondo e scalciavano. Uscii e vidi quel tipo in toga e con un paio di sandali nuovi di zecca venire fuori dal granaio.

Lederman: Democrito! Che ci fa qua?
Democrito: Calmi quei cavalli! Avrebbe dovuto vedere i cavalli che allevavo ad Abdera. Potevano *volare*!
Lederman: Ah sì, bene, come sta?
Democrito: Ha un'ora di tempo? Sono stato invitato nella sala di controllo dell'acceleratore Wake Field che hanno giusto messo in funzione a Teheran il 12 gennaio 2020.
Lederman: Wow! Posso venire?
Democrito: Certo, se fa il bravo. Prenda la mia mano e dica Μασσα δι Πλανχκ (Massa di Planck).
Lederman: Μασσα δι Πλανχκ.
Democrito: Più forte!
Lederman: Μασσα δι Πλανχκ!

Improvvisamente ci ritrovammo in una stanza sorprendentemente piccola che aveva un aspetto totalmente diverso da quello che mi sarei aspettato: il ponte di comando dell'astronave *Enterprise*. C'erano pochi schermi multicolori con delle immagini molto nitide (TV ad alta definizione). Ma i banconi degli oscilloscopi e dei quadranti erano scomparsi. In un angolo un gruppo di giovani uomini e donne stavano discutendo animatamente. Un tecnico vicino a me stava premendo dei pulsanti su una scatola dalle dimensioni del palmo di una mano e guardando uno degli schermi. Un altro tecnico stava parlando in persiano in un microfono.

Lederman: Perché a Teheran?
Democrito: Oh, qualche anno dopo la pace mondiale, l'ONU decise di costruire l'Acceleratore del Nuovo Mondo nell'antico crocevia della civiltà. Il governo qui è uno dei più stabili, ed è un sito molto buono dal punto di vista geologico e da quello della fornitura

di energia a basso costo, d'acqua, di manodopera qualificata e del miglior *shish kebab** a sud di Abdera.

Lederman: E che stanno facendo?

Democrito: Collisioni fra protoni e antiprotoni a 500 TeV. Da quando nel 2005 il Super Collisore scoprì la particella di Higgs a una massa di 422 GeV, c'è questa priorità di esplorare il «settore di Higgs» per vedere se ci sono altri tipi di particelle.

Lederman: Hanno trovato la particella di Higgs?

Democrito: Una delle tante. Si pensa che ce ne sia un'intera famiglia.

Lederman: E nient'altro?

Democrito: Diamine, sì. Avrebbe dovuto essere qui quando i dati online mostrarono questo folle evento con sei getti e otto paia di elettroni. Da allora hanno visto diversi squark, gluini, e anche il fotino...

Lederman: La supersimmetria?

Democrito: Sì. Appena le energie superarono i 20 TeV, tutti questi tipetti cominciarono a saltar fuori.

Democrito disse qualcosa in persiano con forte accento straniero e ci portarono delle tazze di latte di yak bollito. Quando chiesi di poter osservare gli eventi su uno schermo, mi misero in testa un elmetto per ottenere effetti di realtà virtuale e gli eventi, ricostruiti dai dati da Dio sa che genere di computer, cominciarono a passarmi davanti agli occhi. Notai che i fisici del 2020 (bambini dell'asilo nella mia epoca) avevano ancora bisogno di rappresentare l'informazione con immagini. Una giovane donna nera, alta e con una spettacolare acconciatura afro, che passava di lì con quello che sembrava un quaderno d'appunti computerizzato, mi guardò divertita. «Blue jeans, proprio come li portava mio nonno. Con quell'aspetto dovete venire dal quartier generale dell'ONU. Siete un ispettore?»

«No» dissi. «Sono del Fermilab, ma sono stato fuori dal giro per alcuni anni. Che succede di bello?»

Nell'ora seguente venni rimpinzato di una quantità di informazioni da capogiro, reti neurali, algoritmi, *top quark* e punti di calibrazione di Higgs, semiconduttori a diamanti depositati in vuoto, femtobyte e – il peggio di tutto – venticinque anni di progressi sperimentali. La ragazza veniva dal Michigan, un prodotto del prestigioso Istituto superiore di educazione scientifica di Detroit. Suo marito, un ricercatore kazako, lavorava all'Università di Quito. Mi spiegò che la macchina aveva un raggio di centocinquanta chilometri, una sciocchezzuola,

* Specialità gastronomica tipica della regione balcanica e anatolica, consistente in spiedini di carne d'agnello o di montone. (*NdT*)

resa possibile da un decisivo passo avanti nella tecnologia dei superconduttori a temperatura ambiente avvenuto nel 1997. Il suo nome era Mercedes.

Mercedes: Già, il gruppo Ricerca e Sviluppo del Super Collisore si imbatté in questi nuovi materiali mentre stava controllando degli strani effetti nelle leghe di niobio. Da cosa nasce cosa, e così adesso abbiamo questa materia che diventa un superconduttore a 50 gradi Fahrenheit, la temperatura di un giorno freddo in autunno.

Lederman: Qual è il campo critico?

Mercedes: Cinquanta tesla! Se ricordo bene i miei studi di storia, la vostra macchina del Fermilab era a quattro tesla. Oggi ci sono venticinque imprese industriali che lavorano nel settore. L'impatto economico nell'anno finanziario 2019 è stato di circa trecento miliardi di dollari. Il supertreno sopraelevato da New York a Los Angeles viaggia a una velocità di oltre tremila chilometri orari. Grandi mucchi di lana d'acciaio, che ricevono energia da questo nuovo materiale, forniscono d'acqua potabile la maggior parte delle città del mondo. E tutte le settimane si sente di nuove applicazioni.

Democrito, che fino a quel momento se ne era stato seduto in silenzio, interloquì sulla questione centrale.

Democrito: Avete visto qualcosa dentro i quark?

Mercedes (*scuotendo la testa e sorridendo*): Quella era la mia tesi di dottorato. La misurazione migliore si è ottenuta con l'ultimo esperimento del Super Collisore. Il raggio del quark è inferiore all'incredibilmente piccola misura di 10^{-21} centimetri. Per quanto ne sappiamo, i quark e i leptoni sono la migliore approssimazione di un punto a cui possiamo arrivare in fisica.

Democrito (*saltando qua e là, battendo le mani e ridendo istericamente*): *Atomos*! Finalmente!

Lederman: Qualche sorpresa?

Mercedes: Ebbene, un giovane teorico del CUNY – Pedro Monteagudo – ha scritto, usando la teoria Susy e quella di Higgs, una nuova equazione Susy-GUT che ha predetto con successo le masse generate dal campo di Higgs di tutti i quark e i leptoni. Proprio come Bohr aveva spiegato i livelli energetici nell'atomo di idrogeno.

Lederman: Wow! Davvero?

Mercedes: Già, l'equazione di Monteagudo adesso incorpora quella di Dirac, Schrödinger e compagnia cantante. Guardi la mia T-shirt.

Come se avessi bisogno di un simile invito. Ma appena mi fissai sul curioso geroglifico stampato su di essa, tutto cominciò a tremare come in un terremoto, a confondersi e a svanire.

«Merda.» Mi ritrovavo di nuovo a casa mia, la testa penzolante sulle mie carte. Mi capitò sotto gli occhi la fotocopia di un titolo di giornale: IN FORSE AL CONGRESSO I FINANZIAMENTI AL SUPER COLLISORE. Il mio modem stava facendo bip bip, e un messaggio giunto tramite la posta elettronica mi portava l'«invito» a recarmi a Washington per essere ascoltato dalla commissione del senato sull'SSC.

Addio

Tu ed io, caro collega, abbiamo fatto un lungo viaggio da Mileto. Abbiamo percorso il cammino della scienza da quel luogo e quel tempo fino a questo luogo e a questo tempo. Purtroppo abbiamo dovuto trascurare molte delle pietre miliari di questa strada. Ma ad alcune ci siamo fermati: Newton e Faraday, Dalton e Rutherford, oltre, naturalmente, a McDonald's per un hamburger. Abbiamo visto la nuova sinergia fra spazio interno e spazio esterno, e, come chi guida un'auto su una strada circondata da una foresta, abbiamo avuto occasionali colpi d'occhio, che si aprivano fra gli alberi e la bruma, su un imponente edificio: una costruzione intellettuale che va avanti da 2500 anni.

Lungo il cammino ho cercato di inserire delle annotazioni irriverenti sugli scienziati. È importante fare la distinzione fra gli scienziati e la scienza. Gli scienziati, spesso e volentieri, sono uomini come gli altri, e come loro coprono tutto quell'arco di tipi che rende il genere umano così... interessante. Gli scienziati sono placidi e ambiziosi; egocentrici e curiosi; hanno virtù angeliche e peccano di superbia; saggi e infantili; sentimentali, ossessivi, infingardi. Nel sottoinsieme degli esseri umani costituito dagli scienziati ci sono atei, agnostici, indifferenti militanti, credenti e quelli che vedono il Creatore come un nume tutelare personale, o assolutamente saggio o qualche volta maldestro, come Frank Morgan nel *Mago di Oz*.

Anche le capacità degli scienziati variano molto. Questo è un bene per la scienza, perché essa necessita tanto del muratore quanto dell'architetto. Annoveriamo fra di noi talenti di uno spaventoso potere, quelli che sono solo mostruosamente lucidi, quelli che possiedono delle manine d'oro o una soprannaturale intuizione, e quelli che hanno la più vitale fra le qualità scientifiche: la fortuna. Abbiamo anche cretini, impuniti e quelli che sono semplicemente tonti... proprio tonti!

«Vuoi dire rispetto a voialtri scienziati» mi rispose una volta mia madre.

«No, mamma, tonti come è tonta una persona qualsiasi.»

«E allora come hanno fatto a conseguire un dottorato?» obiettò.

«*Sitzfleisch*, mamma.» *Sitzfleisch*: l'abilità di sedersi a fare qualsiasi lavoro con diligenza, e di fare e rifare fino a che, in qualche modo, non sia finito. Quelli che conferiscono i dottorati sono anch'essi umani: prima o poi si arrendono.

Se c'è qualcosa che unifica questa collezione di esseri umani che chiamiamo scienziati, è l'orgoglio e la riverenza con cui ciascuno di noi apporta il suo contributo a quell'edificio intellettuale: la scienza. Può essere solo un mattone, squadrato diligentemente e cementato al suo posto, o può essere un magnifico frontone (per continuare la metafora), posto ad adornare un colonnato eretto dai nostri maestri. Erigiamo la nostra costruzione con un senso di meraviglia, bilanciato da un vigile scetticismo, guidati da ciò che abbiamo trovato quando siamo arrivati, provenienti da ogni luogo, portando con noi tutte le nostre variabili umane, le nostre abitudini culturali, la nostra lingua, ma stabilendo in qualche modo una comunicazione istantanea, una capacità immediata di comprensione, un'empatia nel comune impegno di costruire la torre della scienza.

È tempo di lasciarti tornare alla tua vita normale. Negli ultimi tre anni non vedevo l'ora che giungesse questo momento. Ora devo ammettere che mi mancherai, collega lettore. Sei stato una presenza continua al mio fianco sugli aerei, nelle tranquille notti passate a scrivere. Ti ho immaginato come un professore di storia in pensione, un ragioniere, un universitario, un negoziante di vini, un meccanico di motociclette, uno studente delle superiori e, quando sentivo il bisogno di tirarmi su il morale, una bellissima *contessa** bramosa di accarezzarmi i capelli. Mi mancherai, come quando si finisce un romanzo e un po' dispiace abbandonarne i protagonisti.

La fine della fisica?

Prima che me ne vada, ho qualcosa da aggiungere circa questo lavoro per produrre la T-shirt con la formula finale della fisica. Posso aver dato l'impressione che la particella di Dio, una volta trovata, sarà la rivelazione definitiva di come funziona l'universo. Questo è il terreno dei pensatori veramente profondi, i fisici delle particelle

* In italiano nel testo. (*NdT*)

che sono pagati per fare delle pensate davvero profonde. Alcuni di essi pensano che si arriverà in fondo alla strada del riduzionismo; che conosceremo i costituenti ultimi della materia e che allora la scienza si concentrerà sulla complessità: le partite di calcio, i virus, l'ingorgo stradale dell'ora di punta, una cura per l'odio e la violenza... Cose veramente utili.

C'è un altro punto di vista: che noi siamo come bambini che giocano sulla spiaggia di un vasto oceano (è la metafora di Bentley Glass). In questo caso la frontiera veramente non esiste. Dietro la particella di Dio si rivelerà un mondo di splendente, accecante bellezza, al quale l'occhio della mente si adatterà. Presto percepiremo che non abbiamo tutte le risposte: ciò che c'è dentro l'elettrone, il quark e il buco nero ci condurranno ancora più avanti.

Io inclinerei verso gli ottimisti (o sono pessimisti che presagiscono licenziamenti nel settore?), quelli che credono che «conosceremo tutto», ma lo sperimentale che è in me mi impedisce di crederci veramente. In confronto a quello che richiedono gli esperimenti per arrivare a Oz, alla massa di Planck, a quello che successe prima di 10^{-40} secondi dopo l'Inizio, tutto il nostro viaggio da Mileto a Waxahachie sembra una gita di piacere sul lago Winnebago. Non penso solo ad acceleratori che cingono il sistema solare e a rivelatori di dimensioni proporzionate, ai miliardi e miliardi di ore di sonno che perderanno i miei studenti e i loro, ma soprattutto all'ottimismo che la nostra società dovrebbe nutrire per continuare questa ricerca.

Quello che veramente conosciamo e che conosceremo sempre meglio nel prossimo decennio può misurarsi con l'energia dell'SSC: 40 trilioni di volt. Ma cose importanti devono accadere anche a energie così alte che al confronto quelle dell'SSC sono robetta. Ci sono ancora sconfinate possibilità di avere delle sorprese. Operando sotto nuove leggi di natura oggi inimmaginabili come la teoria quantistica (o l'orologio atomico al cesio) sarebbe stata inimmaginabile per Galileo, potremmo trovare antiche civiltà esistenti dentro i quark. Accidenti! Prima che arrivino gli uomini in camice bianco, lasciatemi passare a un'altra questione sollevata di frequente.

È sorprendente quanto spesso scienziati per altri versi molto competenti dimentichino le lezioni della storia, e precisamente che il maggior impatto avuto dalla scienza con la società sia sempre venuto dalla ricerca dell'a-tomo. Senza nulla togliere all'ingegneria genetica, alla scienza dei materiali o alla fusione controllata, la ricerca dell'a-tomo ha sempre garantito rientri economici svariati milioni di volte superiori alle spese, e non c'è per adesso nessun indizio che ciò

debba cambiare. L'investimento nella ricerca pura, inferiore all'uno per cento dei bilanci delle società industrializzate, ha fatto per trecento anni molto meglio dell'indice Dow Jones. Eppure, di quando in quando veniamo terrorizzati da politici frustrati che vogliono focalizzare la ricerca scientifica sui bisogni *immediati* della società, dimenticando – o forse non l'hanno mai capito – che la maggior parte dei più importanti progressi tecnologici che hanno influenzato la qualità e la quantità della vita umana sono venuti dalla ricerca pura, quella guidata solo dal desiderio di conoscere. Amen.

Finale divino obbligato

Cercando l'ispirazione per scrivere la fine di questo libro, ho letto le conclusioni di alcune dozzine di libri di divulgazione scientifica. Esse sono sempre filosofiche, e compare quasi sempre il Creatore sotto le spoglie favorite dall'autore o dall'autore preferito dell'autore. Ho notato come in questi libri ci siano due tipi di finali. Uno è il finale umile. Il ridimensionamento del genere umano comincia di solito ricordando al lettore come non siamo al centro di nulla: il nostro pianeta non è il centro del sistema solare, il sistema solare non è il centro della galassia e la nostra galassia non è neppure un gran che come galassia. Se questo poi non è abbastanza per instillare a un laureato di Harvard il dubbio che lui non sia il centro dell'universo, veniamo a conoscere che lo stesso materiale di cui siamo fatti noi e le cose che ci circondano consiste di un campione molto piccolo degli oggetti fondamentali dell'universo. Questi autori notano poi come l'umanità e tutte le sue istituzioni e i suoi monumenti importino molto poco per l'evoluzione del cosmo. Il maestro dei finali umili può essere considerato Bertrand Russell:

> Tale, in breve, ma anche più privo di scopo, e vuoto di significato, è il mondo che la Scienza ci presenta. Dentro un tale mondo, e in nessun altro, dobbiamo trovare d'ora in avanti una casa ai nostri ideali. Che l'uomo è il prodotto di cause cieche; che la sua origine, il suo sviluppo, le sue speranze e le sue paure, le sue passioni e le sue credenze non sono altro che il risultato dell'accidentale dislocazione di certi atomi; che nessun fuoco interiore, nessun eroismo, nessuna intensità di pensieri e sentimenti può prolungare la vita individuale oltre la tomba; che tutte le fatiche della storia, tutta la devozione, l'ispirazione, la brillantezza del genio umano al suo apice, sono destinate a estinguersi con il sistema solare, e che l'intero monumento della razza umana deve inevitabilmente mischiarsi ai detriti di un universo in rovina, tutte queste cose, benché non al di sopra di ogni discussione, sono tuttavia così praticamente certe che nessuna filosofia che le rifiuti può sperare di esser presa sul serio. Solo dentro il quadro di queste verità, solo sul solido

fondamento di un'inflessibile disperazione, la casa dell'anima può d'ora in avanti essere saldamente costruita.

Breve e impotente è la vita dell'Uomo, su di lui e sulla sua razza il destino cala lento ma sicuro, oscuro e spietato...

«Accidenti, il tipo ha le idee chiare» dico io modestamente. Steven Weinberg l'ha messa giù in maniera più succinta: «Più l'universo sembra comprensibile, più sembra privo di scopo». Così siamo definitivamente umiliati.

Ci sono quelli che prendono la direzione completamente opposta e che vedono lo sforzo di comprendere l'universo niente affatto umiliante, ma al contrario esaltante. Questo gruppo anela a «conoscere la mente di Dio» e dice che, facendo ciò, noi diventiamo parte essenziale dell'intero processo. In maniera emozionante veniamo rimessi nella posizione che ci confà al centro dell'universo. Alcuni filosofi di questa categoria si spingono fino al punto di dire che il mondo è un prodotto della mente umana; altri, un po' più modestamente, dicono che è la stessa esistenza della nostra mente, anche se apparsa su un insignificante pianeta, che deve essere una parte cruciale del «grande piano». Al che io dico, ancora più modestamente, che è bello essere necessari.

Ma io preferisco una combinazione dei due approcci, e se mettiamo l'Onnipotente da qualche parte, lasciamolo fare a quelli che ci hanno dato così tante memorabili immagini di Lei. Ecco qua il copione per l'ultima scena dell'adattamento hollywoodiano del libro.

Il protagonista è il presidente della Società di astrofisica, la sola persona ad aver vinto tre premi Nobel. Esterno notte su una spiaggia, lui sta ben piantato sulle gambe divaricate, agitando il pugno verso il cielo stellato. Parlando a nome dell'umanità, conscio delle sue più grandiose conquiste, egli grida all'universo, coprendo con la sua voce il rumore delle onde: «Io ti ho creato. Tu sei il prodotto della mia mente... la mia visione e la mia invenzione. Sono stato io che ti ho dato un senso e uno scopo, solo per me tu sei bello. Se la mia coscienza non esistesse, che utilità potresti mai avere?».

Una vaga luce turbinante appare nel cielo e un fascio luminoso investe il nostro uomo sulla spiaggia. Al suono degli accordi della *Messa in si minore* di Bach, o forse dell'introduzione della *Sagra della primavera* di Stravinskij, la luce in cielo lentamente disegna le fattezze del Suo volto, sorridente, ma con un'espressione di infinita, dolce tristezza.

L'inquadratura sfuma. Partono i titoli di coda.

Nota sulla storia e sulle fonti

Quando gli scienziati parlano di storia, bisogna stare attenti. Non è la storia che potrebbe scrivere uno storico della scienza di professione. Si potrebbe chiamarla «storia immaginaria». Il fisico Richard Feynman l'ha chiamata storia mitica addomesticata. Perché? Gli scienziati (certamente questo scienziato) usano la storia a fini pedagogici. «Vedete, questa è una sequenza di eventi scientifici. Prima c'era Galileo, poi Newton e la sua mela...» Naturalmente, questo non è il modo in cui le cose sono successe. C'erano folle di altra gente che aiutava e ostacolava. L'evoluzione di un nuovo concetto può essere un affare estremamente complicato, anche prima dell'era del fax. Una penna acuminata può fare molti danni.

Ai tempi di Newton c'era già una fitta letteratura fatta di articoli pubblicati, libri, lettere, lezioni. La guerra delle priorità (a chi vada il merito di una scoperta) comincia molto prima di Newton. Gli storici mettono ordine in tutto questo bailamme e producono un'ampia e ricca letteratura sulle persone e i concetti. Dal punto di vista di chi racconta una storia, però, la storia mitica ha il grande pregio di eliminare tutti i rumori di fondo della storia vera.

Per quanto riguarda le fonti, quando si tirano le somme di cinque decenni di carriera in fisica, è difficile identificare la fonte precisa di ogni singolo fatto, detto o frammeto d'informazione. Per alcune delle migliori storielle in campo scientifico può addirittura non esserci nessuna fonte, ma esse sono diventate tanta parte della coscienza collettiva degli scienziati che sono «vere», siano veramente accadute oppure no. Nonostante ciò, abbiamo usato alcuni libri, e qui di seguito citiamo alcuni dei migliori, a beneficio del lettore. Non si tratta in alcun modo di una lista completa, e neppure vogliamo insinuare che esse siano le pubblicazioni più originali sulla materia o le fonti migliori per le notizie citate. Le elenco senza un ordine particolare, eccettuato l'arbitrio dello sperimentatore...

Ho approfittato di diverse biografie di Newton, specialmente quella di John Maynard Keynes e *Never at Rest* di Richard Westfall (Cambridge, Cambridge University Press, 1980; trad. it. *Newton*, Torino, Einaudi, 1989). *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World* di Abraham Pais (New York, Oxford University Press, 1986) è stata una fonte di incalcolabile valore, così come il classico *A History of Science* di Sir William Dampier (Cam-

bridge, Cambridge University Press, 1948; trad. it. *Storia della scienza*, Torino, Einaudi, 1953). Anche le recenti biografie *Schrödinger: Life and Thought* di Walter Moore (Cambridge, Cambridge University Press, 1989) e *Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg* di David Cassidy (New York, W.H. Freeman, 1991) sono state di grande aiuto, così come *The Life and Times of Tycho Brahe* di John Allyne Gade (Princeton, Princeton University Press, 1947), *Galileo at Work: His Scientific Biography* di Stillman Drake (Chicago, University of Chicago Press, 1978; trad. it. *Galileo. Una biografia scientifica*, Bologna, il Mulino, 1988), *Galileo eretico* di Pietro Redondi (Torino, Einaudi, 1983) ed *Enrico Fermi, fisico* di Emilio Segrè (Bologna, Zanichelli, 1987[2]). Siamo anche debitori nei confronti di Heinz Pagels per due libri, *The Cosmic Code* (New York, Simon & Schuster, 1982; trad. it. *Il codice cosmico*, Torino, Boringhieri, 1984) e *Perfect Symmetry* (New York, Simon & Schuster, 1985), e di Paul Davies per il suo *Superforce* (New York, Simon & Schuster, 1984; trad. it. *Superforza. Verso una teoria unificata dell'universo*, Milano, Mondadori, 1986).

Alcuni libri non scritti da scienziati hanno fornito aneddoti, citazioni e altre valide informazioni: specialmente *Scientific Temperaments* di Philip J. Hilts (New York, Simon & Schuster, 1982) e *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics* di Robert P. Crease e Charles C. Mann (New York, Macmillan, 1986; trad. it. *Alla ricerca dell'uno. L'unificazione delle forze della natura*, Milano, Mondadori, 1987).

Lo scenario dell'Inizio, così come descritto nel testo, è più filosofia che fisica. Il cosmologo dell'Università di Chicago Michael Turner dice che è un'ipotesi ragionevole. Charles C. Mann ha fornito alcuni simpatici dettagli sul notevole numero 137 nel suo articolo sulla rivista «Omni», intitolato, ovviamente, *137*. Abbiamo consultato un certo numero di fonti per il pensiero di Democrito, Leucippo, Empedocle e gli altri filosofi presocratici: *A History of Western Philosophy* di Bertrand Russell (New York, Touchstone, 1972; trad. it. *Storia della filosofia occidentale*, Milano, Longanesi, 1982); *The Greek Philosophers: From Thales to Aristotle* (New York, Harper & Brothers, 1960) e *A History of Greek Philosophy* (Cambridge, Cambridge University Press, 1978) di W.K.C. Guthrie; *A History of Philosophy: Greece & Rome* di Frederick Copleston (New York, Doubleday, 1960; trad. it. *Storia della filosofia*, vol. 1: *Grecia e Roma*, Brescia, Paideia, 1966); e *The Portable Greek Reader*, a cura di W.H. Auden (Viking Press, 1948).

Molte date e altri dettagli sono stati controllati su *The Dictionary of Scientific Biography*, a cura di Charles C. Gillispie (New York, Scribner's, 1981), un'opera in più volumi che può far trascorrere molte piacevoli ore in biblioteca.

Fonti miscellanee includono *Johann Kepler* (Baltimore, Williams & Wilkins, 1931), che è una raccolta di saggi, e *Chemical Atomism in the Nineteenth Century* di Alan J. Rocke (Columbus, Ohio State University Press, 1984). La cupa citazione da Bertrand Russell nel capitolo IX è tratta da *A Free Man's Worship* (1923).

Ringraziamenti

Crediamo che sia stato Anthony Burgess (o era Burgess Meredith?) a proporre un emendamento alla Costituzione per proibire a un autore di includere nei ringraziamenti anche quello alla moglie per aver battuto a macchina il manoscritto. Le nostre mogli non battono a macchina, così quello ve lo risparmiate. Comunque, altri ringraziamenti dobbiamo farli.

Michael Turner, un fisico teorico e cosmologo, ha passato al setaccio il manoscritto per trovare piccoli errori teorici (e qualcuno non tanto piccolo); ne ha trovati molti, li ha riparati e ci ha rimessi in carreggiata. Dato il pregiudizio a favore degli sperimentali che percorre tutto il libro, è come se Martin Lutero avesse chiesto al papa di correggere le bozze delle sue novantacinque tesi. Mike, se ci sono ancora degli errori, la colpa è nostra.

Il Fermi National Accelerator Laboratory (e il suo santo patrono a Washington, il Dipartimento federale per l'energia) ha fornito molto dell'aiuto spirituale e una parte non piccola dell'aiuto meccanico.

Willis Bridegam, bibliotecaria dell'Amherst College, ci ha permesso di usare le risorse della Robert Frost Library e della rete di biblioteche delle Cinque Università. Karen Fox si è occupata della parte creativa della ricerca.

Peg Anderson, nostro referente nella casa editrice, è rimasta tanto coinvolta nel soggetto da fare sempre le domande giuste e guadagnarsi così sul campo un master *ad honorem* in fisica.

A Kathleen Stein, l'incomparabile redattrice di «Omni» che si occupa delle interviste, si deve il merito di avere assegnato l'intervista che costituì il germe del libro. (O sarebbe meglio dire il virus?)

Lynn Nesbit ha avuto più fede nel progetto di quanta ne abbiamo avuta noi.

Infine John Sterling, il nostro responsabile editoriale, che ha sudato le proverbiali sette camicie. Ci auguriamo che dovunque egli sia in questo momento, magari immerso in un bel bagno caldo, si ricordi di noi e ci mandi un appropriato accidenti.

Leon M. Lederman
Dick Teresi

Indice analitico

Volumi pubblicati nella collezione «Saggi»

T. Garton Ash, *Le rovine dell'Impero*
Europa centrale 1980-1990

C. Fischler, *L'onnivoro*
Il piacere di mangiare nella storia e nella scienza

F. Diaz, *La stagione arida*
Riflessioni sulla vita civile d'Italia dal dopoguerra a oggi

L. Sciascia, *Fuoco all'anima*
Conversazioni con Domenico Porzio

V. M. Manfredi, *Mare greco*
Eroi ed esploratori nel Mediterraneo antico

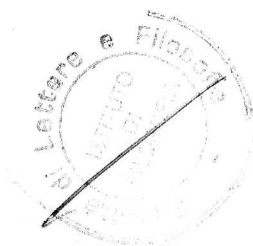
L. Margulis - D. Sagan, *La danza misteriosa*
Perché siamo animali sessuali

G. Greer, *La seconda metà della vita*
Come cambiano le donne negli anni della maturità

J. Mehler - E. Dupoux, *Appena nato*
Che cosa vede, sente, capisce un bambino sin dai primi giorni di vita

E. Fromm, *Fuga dalla libertà*

E. Fromm, *L'amore per la vita*

R. Bly, *Per diventare uomini*
Come un bambino spaventato si può trasformare in un uomo completo e maturo

S. Baur, *L'uomo che credeva di essere un dinosauro*
E altre storie da una clinica psichiatrica

I. Asimov, *L'universo invisibile*
Storia dell'infinitamente piccolo dai filosofi greci ai quark

D. Bisutti, *La poesia salva la vita*
Capire noi stessi e il mondo attraverso le parole

R. Dawkins, *Il gene egoista*
La parte immortale di ogni essere vivente

S. Veronesi, *Occhio per occhio*
La pena di morte in quattro storie

S. Vegetti Finzi, *Il romanzo della famiglia*
Passioni e ragioni del vivere insieme

J. Willi, *Che cosa tiene insieme le coppie*

F. Di Trocchio, *Le bugie della scienza*
Perché e come gli scienziati imbrogliano

M. Lindauer, *Messaggio senza parole*
Come comunicano gli animali

D. Grossman, *Un popolo invisibile*
I Palestinesi d'Israele

M. Piattelli Palmarini, *L'illusione di sapere*
Che cosa si nasconde dietro i nostri errori

P. Davies, *La mente di Dio*
Il senso della nostra vita nell'universo

W. Pasini, *Volersi bene, volersi male*

E. Fromm, *Avere o essere?*

S. Weinberg, *Il sogno dell'unità dell'universo*

L. e F. Cavalli-Sforza, *Chi siamo*
La storia della diversità umana

A. Torno, *Pro e contro Dio*
Tre millenni di ragione e di fede

K. Lorenz, *La scienza naturale dell'uomo*
Il manoscritto russo

G. Abraham, *Le età della vita*

S. Zecchi, *Sillabario del nuovo millennio*

C.M. Martini, *La preghiera di chi non crede*

H. Laborit, *Lo spirito del solaio*
Ricordi e riflessioni di uno scienziato

G. García Márquez, *Taccuino di cinque anni (1980-1984)*

T. Garton Ash, *In nome dell'Europa*

E. Fromm, *Anima e società*

S. Argentieri - P. Carrano, *L'uomo nero*
Piccolo catalogo delle paure infantili

D. Francescato, *Figli sereni di amori smarriti*
Ragazzi e adulti dopo la separazione

G. Dacquino, *Che cos'è l'amore*
L'affetto e la sessualità nel rapporto di coppia

D. Danna, *Amiche, compagne, amanti*
Storia dell'amore tra donne

G. Smoot, *Nelle pieghe del tempo*
La scoperta dell'universo neonato

A. Salvo, *Depressione e sentimenti*
L'incapacità di essere felici

P. Ottone, *Il tramonto della nostra civiltà*

S. Vegetti Finzi (con A. M. Battistin), *A piccoli passi*
La psicologia dei bambini dall'attesa ai cinque anni

A. Torno, *Senza Dio?*
Due secoli di riflessioni tra speranza e negazione

S. B. Nuland, *Come moriamo*
Riflessioni sull'ultimo capitolo della vita

E. Bencivenga, *Giocare per forza*
Critica della società del divertimento

S. Coren, *L'intelligenza dei cani*

J Weiner, *Il becco del fringuello*
Giorno per giorno l'evoluzione delle specie

E. Fromm, *L'arte di ascoltare*

T. Regge, *Infinito*
Viaggio ai limiti dell'universo

E.P. Sanders, *Gesù*
La verità storica

M. Piattelli Palmarini, *L'arte di persuadere*
Come impararla, come esercitarla, come difendersene

C.M. Cipolla, *Storia facile dell'economia italiana dal Medioevo a oggi*
raccontata a grandi linee da Carlo M. Cipolla e altri autori

G. Abraham, *Un amore tutto nuovo*
Innamorarsi dopo i quarant'anni

F. Furet, *Il passato di un'illusione*
L'idea comunista nel XX secolo

M. e N. Ammanniti, *Nel nome del figlio*
L'adolescenza raccontata da un padre e da un figlio

G. Pietropolli-Charmet, *Un nuovo padre*
Il rapporto padre-figlio nell'adolescenza

D. Francescato (con A. Putton), *Stare meglio insieme*
Oltre l'individualismo: imparare a crescere e a collaborare con gli altri

F.J. Tipler, *La fisica dell'immortalità*
Dio, la cosmologia e la risurrezione dei morti

W. Pasini, *A che cosa serve la coppia*

G. Ravasi, *Il racconto del cielo*
Le storie, le idee, i personaggi dell'Antico Testamento

A. Sullivan, *Praticamente normali*
Le ragioni dell'omosessualità

P. Melograni, *La modernità e i suoi nemici*

P. Davies, *I misteri del tempo*
L'universo dopo Einstein

G. Dacquino, *Paura d'amare*
Come evitare e superare i fallimenti affettivi

S. Dalla Bernardina, *Il ritorno alla natura*
L'utopia verde tra accia ed ecologia

E. Fromm, *I cosiddetti sani*
La patologia della normalità

G. Mammarella - Z. Ciuffoletti, *Il declino*
Le origini storiche della crisi italiana

L. Lederman con D. Teresi, *La particella di Dio*
Se l'universo è la domanda, qual è la risposta?

Leon Lederman, premio Nobel per la fisica 1988, insegna all'Illinois Institute of Technology di Chicago. È presidente dell'American Association for the Advancement of Science. Dal 1979 al 1989 ha diretto il Fermi National Accelerator Laboratory e progettato un particolare acceleratore di particelle, il Superconducting Super Collider, poi realizzato a Waxahachie (Texas). Ha pubblicato, con David Schramm, *From Quarks to the Cosmos* (Scientific American Library 1989).

Dick Teresi, giornalista, è stato direttore della rivista «Omni». Ha pubblicato, con Judith Hooper, *The Three-Pound Universe* (Macmillan 1986) e, con Jeff Hecht, *Laser. A Supertool of the 1980s* (Ticknor and Fields 1992).

Lire 38.000

La storia del lungo viaggio al centro dell'atomo, per risolvere un giallo che dura da 2500 anni.

ISBN 88-04-37156-0